

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
1000-2-9**

Première édition
First edition
1996-02

Compatibilité électromagnétique (CEM) –

Partie 2:

Environnement –

Section 9: Description de l'environnement

IEMN-HA – Perturbations rayonnées

Publication fondamentale en CEM

Electromagnetic compatibility (EMC) –

Part 2:

Environment –

Section 9: Description of HEMP

environment – Radiated disturbance

Basic EMC publication



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 1000-2-9: 1996

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI)*, qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit tirés du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*;
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*;
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas*;

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale*.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available from the IEC Central Office.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*, which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV or have been specifically approved for the purpose of this publication.

Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications:

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology*;
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets*;
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams*;

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice*.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
1000-2-9**

Première édition
First edition
1996-02

Compatibilité électromagnétique (CEM) –

Partie 2:

Environnement –

Section 9: Description de l'environnement

IEMN-HA – Perturbations rayonnées

Publication fondamentale en CEM

Electromagnetic compatibility (EMC) –

Part 2:

Environment –

Section 9: Description of HEMP

environment – Radiated disturbance

Basic EMC publication

© CEI 1996 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

T

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
 Articles	
1 Domaine d'application et objet.....	6
2 Référence normative	6
3 Généralités	6
4 Définitions	8
5 Description de l'environnement IEMN-HA, paramètres de rayonnement.....	14
5.1 Explosion à haute altitude	14
5.2 Extension spatial de l'onde IEMN-HA à la surface de la terre.....	18
5.3 Variation de l'onde IEMN-HA avec le temps	18
5.4 Composante du champ magnétique	34
5.5 Amplitude et spectre de fluence	36
5.6 Evaluation des ondes IEMN-HA initiale, intermédiaire et finale	40
5.7 Réflexion et transmission	40

CONTENTS

	Page
FOREWORD.....	5
Clauses	
1 Scope and object	7
2 Normative reference	7
3 General	7
4 Definitions	9
5 Description of HEMP environment, radiated parameters	15
5.1 High-altitude bursts.....	15
5.2 Spatial extent of HEMP on the earth's surface.....	19
5.3 HEMP time dependence.....	19
5.4 Magnetic field component.....	35
5.5 HEMP amplitude and energy fluence spectrum	37
5.6 Weighting of the early, intermediate and late-time HEMP	41
5.7 Reflection and transmission	41

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

Partie 2: Environnement –

Section 9: Description de l'environnement IEMN-HA –
Perturbations rayonnées – Publication fondamentale en CEM

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des comités d'études où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 3) Ces décisions constituent des recommandations internationales publiées sous forme de normes, de rapports techniques ou de guides et agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure du possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

La Norme internationale CEI 1000-2-9 a été établie par le sous-comité 77C: Immunité à l'impulsion électromagnétique nucléaire à haute altitude (IEMP-HA), du comité d'études 77 de la CEI: Compatibilité électromagnétique.

Elle a le statut de publication fondamentale en CEM en accord avec le Guide 107 de la CEI.

Le texte de la présente norme est issu des documents suivants:

DIS	Rapport de vote
77C/27/FDIS	77C/34/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

La CEI 1000 est constituée des parties suivantes, regroupées sous le titre général *Compatibilité électromagnétique*:

- Partie 1: Généralités
- Partie 2: Environnement
- Partie 3: Limites
- Partie 4: Techniques d'essai et de mesure
- Partie 5: Guide d'installation et d'atténuation
- Partie 6: Normes génériques
- Partie 9: Divers

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –

Part 2: Environment –
Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance –
Basic EMC publication

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international cooperation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by technical committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.

International Standard IEC 1000-2-9 has been prepared by sub-committee 77C: Immunity to high altitude nuclear electromagnetic pulse (HEMP), of IEC technical committee 77: Electromagnetic compatibility.

It has the status of a Basic EMC publication in accordance with IEC Guide 107.

The text of this part is based on the following documents:

DIS	Report on voting
77C/27/FDIS	77C/34/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

IEC 1000 consists of the following parts, under the general title *Electromagnetic compatibility*:

- Part 1: General
- Part 2: Environment
- Part 3: Limits
- Part 4: Testing and measurement techniques
- Part 5: Installation and mitigation guidelines
- Part 6: Generic standards
- Part 9: Miscellaneous

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

Partie 2: Environnement –

Section 9: Description de l'environnement IEMN-HA – Perturbations rayonnées – Publication fondamentale en CEM

1 Domaine d'application et objet

La présente section de la CEI 1000-2 définit l'environnement IEMN-HA (impulsion électromagnétique à haute altitude) consécutif à une explosion nucléaire à haute altitude.

Deux cas sont généralement étudiés:

- les explosions nucléaires à haute altitude;
- les explosions nucléaires à basse altitude.

Pour les systèmes civils, le cas le plus important est celui des explosions nucléaires à haute altitude. Dans ce cas, les autres effets de l'explosion nucléaire (souffle, onde de choc au sol, rayonnements thermiques et ionisants nucléaires) n'existent pas au niveau du sol. Les impulsions électromagnétiques liées à l'explosion peuvent cependant perturber et endommager les systèmes de communication, les systèmes électroniques et le réseau électrique, mettant par là même en péril l'équilibre de la société moderne.

Le but de cette norme est d'établir une référence commune sur l'environnement IEMN-HA permettant de définir des contraintes réalistes à appliquer afin d'évaluer les performances des équipements atteints.

2 Référence normative

Le document normatif suivant contient des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente section de la CEI 1000-2. Au moment de la publication, l'édition indiquée était en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente section de la CEI 1000-2 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer l'édition la plus récente du document normatif indiqué ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes Internationales en vigueur.

CEI 50(161): 1990, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 161: Compatibilité électromagnétique*

3 Généralités

Une explosion nucléaire à haute altitude (supérieure à 30 km) engendre trois types d'impulsions électromagnétiques observées à la surface de la terre:

- IEMN-HA initiale (rapide);
- IEMN-HA intermédiaire (moyenne);
- IEMN-HA finale (lente);

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –

Part 2: Environment – Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance – Basic EMC publication

1 Scope and object

This section of IEC 1000-2 defines the high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) environment that is one of the consequences of a high-altitude nuclear explosion.

Those dealing with this subject consider two cases:

- high-altitude nuclear explosions;
- low-altitude nuclear explosions.

For civil systems, the most important case is the high-altitude nuclear explosion. In this case, the other effects of the nuclear explosion: blast, ground shock, thermal and nuclear ionizing radiation are not present at the ground level. However the electromagnetic pulse associated with the explosion may cause disruption of, and damage to, communication, electronic and electric power systems thereby upsetting the stability of modern society.

The object of this standard is to establish a common reference for the HEMP environment in order to select realistic stresses to apply to victim equipment for evaluating their performance.

2 Normative reference

The following normative document contains provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this section of IEC 1000-2. At the time of publication, the edition indicated was valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this section of IEC 1000-2 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 50(161): 1990, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 161: Electromagnetic compatibility*

3 General

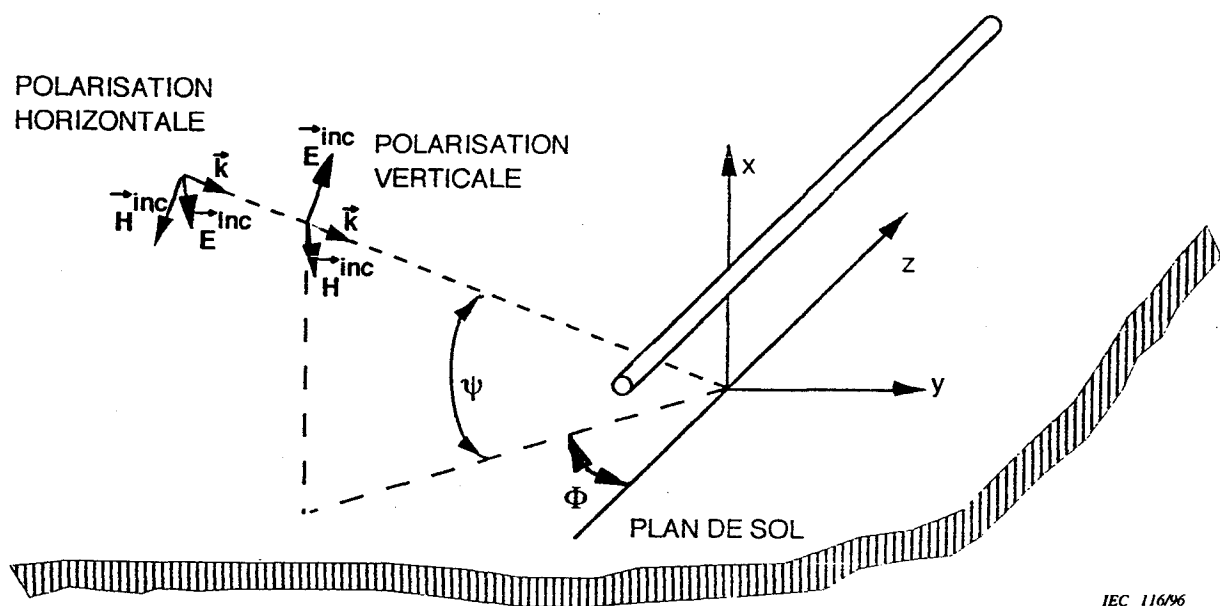
A high-altitude (above 30 km) nuclear burst produces three types of electromagnetic pulses which are observed on the earth's surface:

- early-time HEMP (fast);
- intermediate-time HEMP (medium);
- late-time HEMP (slow):

Par le passé on s'est surtout intéressé à l'impulsion IEMN-HA initiale précédemment appelée simplement onde IEMN-HA. Nous utiliserons ici indifféremment «IEM à haute altitude» ou «IEMN-HA» pour désigner les trois types d'impulsions. Le terme «IEMN»¹⁾ désigne de nombreuses catégories d'impulsions nucléaires IEM y compris celles qui sont produites par des explosions en surface (SREMP)²⁾ ou sur des systèmes spatiaux (SGEMP)³⁾.

L'impulsion IEMN-HA étant produite par une détonation à haute altitude, nous n'observons pas à la surface de la terre d'autres phénomènes propres à l'environnement nucléaire militaire tels que rayons gamma, dégagement de chaleur et ondes de choc. Une impulsion IEMN-HA ayant des incidences sur des équipements électroniques éloignés a été signalée lors d'essais nucléaires américains à haute altitude dans le Pacifique Sud au début des années soixante.

4 Définitions



IEC 116/96

Figure 1 – Géométrie utilisée pour la définition de la polarisation et des angles d'élévation ψ et d'azimut ϕ

4.1 angle de site dans le plan vertical (angle d'élévation), Ψ : Angle Ψ mesuré dans le plan vertical, compris entre une surface horizontale plane telle que le sol et le vecteur de propagation (voir figure 1).

1) IEMN: Impulsion électromagnétique nucléaire.

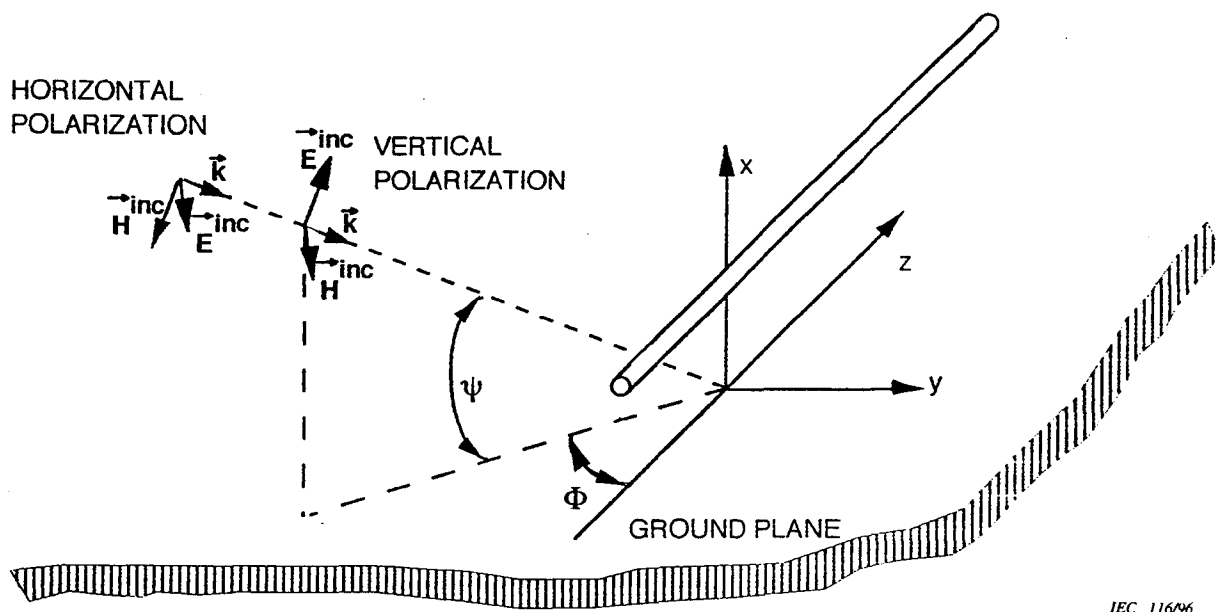
2) SREMP: Source Region EMP (impulsion électromagnétique nucléaire de la région source).

3) SGEMP: System Generated EMP (impulsion électromagnétique nucléaire générée par le système).

Historically, most interest has been focused on the early-time HEMP which was previously referred to as simply "HEMP". Here we will use the term high-altitude "EMP" or "HEMP" to include all three types. The term NEMP¹⁾ covers many categories of nuclear EMP's including those produced by surface bursts (SREMP)²⁾ or created on space systems (SGEMP)³⁾.

Because the HEMP is produced by a high-altitude detonation, we do not observe other nuclear weapon environments such as gamma rays, heat and shock waves at the earth's surface. HEMP was reported from high-altitude U.S. nuclear tests in the South Pacific during the early 1960's, producing effects on electronic equipment far from the burst location.

4 Definitions



IEC 116/96

Figure 1 – Geometry for the definition of polarization and of the angles of elevation ψ and azimuth ϕ

4.1 angle of elevation in the vertical plane Ψ : Angle ψ measured in the vertical plane between a flat horizontal surface such as the ground and the propagation vector (see figure 1).

1) NEMP: Nuclear ElectroMagnetic Pulse.

2) SREMP: Source Region EMP.

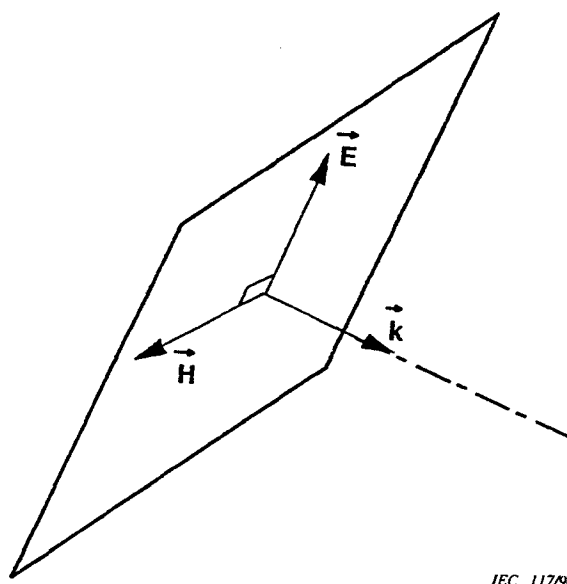
3) SGEMP: System Generated EMP.

4.2 angle d'azimut, ϕ : Angle compris entre la projection du vecteur de propagation sur le sol et l'axe principal de l'objet atteint (axe z pour la ligne de transmission de la figure 1).

4.3 onde composite: Onde maximalisant les caractéristiques importantes d'un groupe d'ondes.

4.4 couplage: Interaction du champ IEMN-HA avec un système et produisant des courants et tensions à la surface du système et dans ses câbles. Les tensions sont produites par des charges induites. Elles ne sont définies qu'aux basses fréquences ayant des longueurs d'onde supérieures aux dimensions des surfaces ou aux longueurs d'entrefer.

4.5 sens de propagation des ondes électromagnétiques: Sens du vecteur de propagation $\vec{k}$, perpendiculairement au plan contenant les vecteurs des champs électrique et magnétique (figure 2).



IEC 117/96

Figure 2 – Géométrie utilisée pour la définition de l'onde plane

4.6 E_1 , E_2 , E_3 : Termes utilisés pour les champs électriques des ondes IEMN-HA initiale, intermédiaire et finale.

4.7 IEM: Toute impulsion électromagnétique, description générale.

4.8 fluence: Intégrale du vecteur de Poynting en fonction du temps, exprimée en J/m².

4.2 azimuth angle, ϕ : Angle between the projection of the propagation vector on the ground plane and the principal axis of the victim object (z axis for the transmission line of figure 1).

4.3 composite waveform: Waveform which maximizes the important features of a group of waveforms.

4.4 coupling: Interaction of the HEMP field with a system to produce currents and voltages on system surfaces and cables. Voltages result from the induced charges and are only defined at low frequencies with wavelengths larger than the surface or gap dimensions.

4.5 direction of propagation of the electromagnetic wave: Direction of the propagation vector $\vec{k}$, perpendicular to the plane containing the vectors of the electric and the magnetic fields (see figure 2).

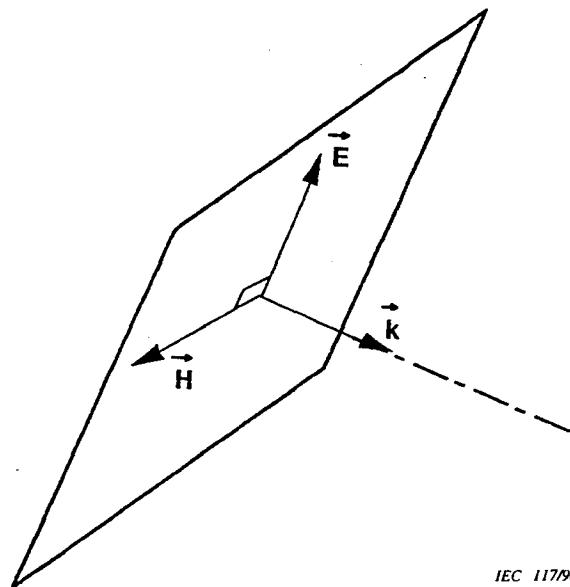


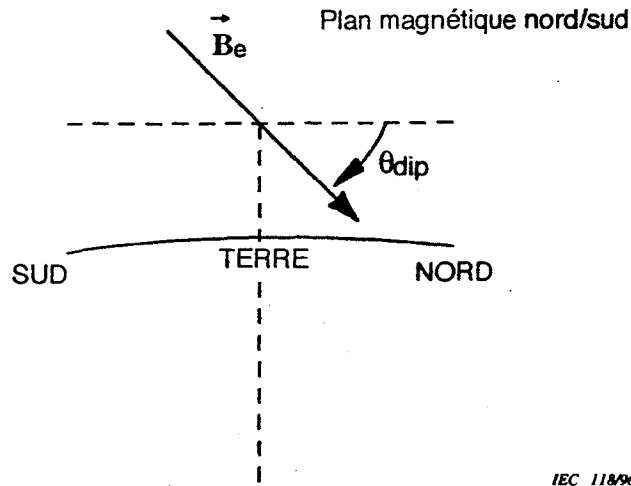
Figure 2 – Geometry for the definition of the plane wave

4.6 E_1, E_2, E_3 : Terminology for the early, intermediate and late-time HEMP electric fields.

4.7 EMP: Any electromagnetic pulse, general description.

4.8 energy fluence: Integral of the Poynting vector over time; presented in units of J/m².

4.9 Angle d'inclinaison géomagnétique, θ_{dip} : Angle d'inclinaison formé par le vecteur d'induction géomagnétique $\vec{B}_e$ mesuré par rapport à l'horizontale locale dans le plan magnétique nord/sud. $\theta_{\text{dip}} = 90^\circ$ au pôle nord magnétique et -90° au pôle sud magnétique.



IEC 118/96

Figure 3 – Angle d'inclinaison géomagnétique

4.10 point zéro au sol: Point situé à la surface du sol immédiatement au-dessous de l'explosion.

4.11 IEMN-HA: Impulsion électromagnétique nucléaire haute altitude.

4.12 haute altitude (explosion nucléaire): Altitude d'explosion supérieure à 30 km.

4.13 ADE: Altitude d'explosion.

4.14 polarisation horizontale: Une onde électromagnétique est polarisée horizontalement lorsque le vecteur du champ magnétique se trouve dans le plan d'incidence et le vecteur du champ électrique perpendiculaire au plan d'incidence, et donc parallèle au plan du sol (figure 1). (Ce type de polarisation est également appelé polarisation électrique perpendiculaire ou transverse électrique (TE).)

4.15 plan d'incidence: Plan formé par le vecteur de propagation et la normale au plan du sol.

4.16 basse altitude (explosion nucléaire): Altitude d'explosion inférieure à 1 km.

4.9 geomagnetic dip angle, θ_{dip} : Dip angle of the geomagnetic flux density vector $\vec{B}_e$, measured from the local horizontal in the magnetic north-south plane. $\theta_{\text{dip}} = 90^\circ$ at the magnetic north pole, -90° at the magnetic south pole.

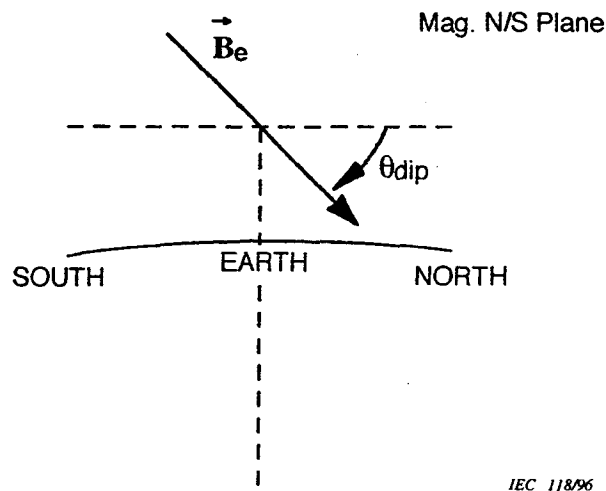


Figure 3 – Geomagnetic dip angle

4.10 ground zero: Point on the earth's surface directly below the burst; sometimes called surface zero.

4.11 HEMP: High-altitude nuclear EMP.

4.12 high-altitude (nuclear explosion): Height of burst above 30 km altitude.

4.13 HOB: Height of burst.

4.14 Horizontal polarization: An electromagnetic wave is horizontally polarized if the magnetic field vector is in the incidence plane and the electric field vector is perpendicular to the incidence plane and thus parallel to the ground plane (figure 1). (This type of polarization is also called perpendicular or transverse electric (TE).)

4.15 incidence plane: Plane formed by the propagation vector and the normal to the ground plane.

4.16 low-altitude (nuclear explosion): Height of burst below 1 km altitude.

4.17 IEMN: Impulsion électromagnétique (IEM) nucléaire. Tout type d'onde IEM provoqué par une explosion nucléaire.

4.18 polarisation: Orientation du vecteur de champ électrique.

4.19 rayonnement initial: Energie nucléaire libérée dans la microseconde qui suit l'explosion.

4.20 SREMP: Impulsion électromagnétique (IEM) de la région source. Onde IEMN produite dans toute région où un rayonnement initial est déjà présent produisant des courants (sources) dans l'atmosphère.

4.21 point de tangence: Tout point situé à la surface de la terre par lequel peut passer une tangente à la terre provenant du point d'explosion.

4.22 rayon de tangence: Distance mesurée à la surface de la terre entre le point zéro au sol et tout point de tangence.

4.23 polarisation verticale: Une onde électromagnétique est polarisée verticalement lorsque le vecteur du champ électrique se trouve dans le plan d'incidence et le vecteur du champ magnétique perpendiculaire au plan d'incidence, et donc parallèle au plan du sol (figure 1). (Ce type de polarisation est également appelé polarisation magnétique parallèle ou transverse magnétique (TM).)

5 Description de l'environnement IEMN-HA, paramètres de rayonnement

5.1 Explosion à haute altitude

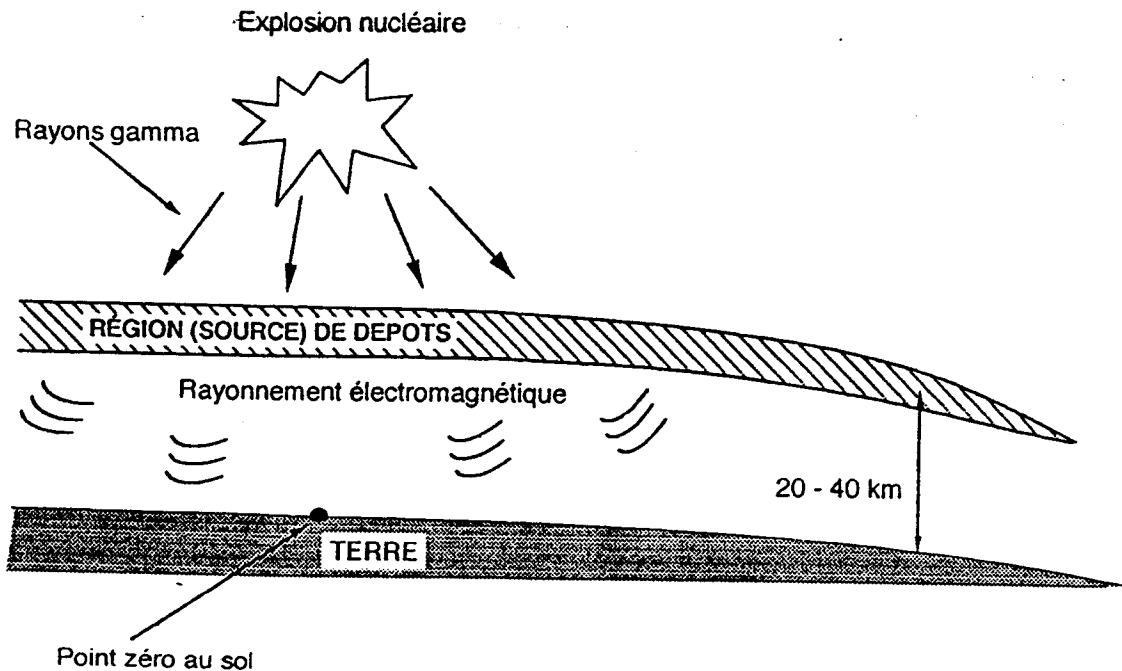
Lorsqu'une arme nucléaire explose à haute altitude, les radiations initiales (rayons x, rayons gamma et neutrons) déposent leur énergie dans l'air dense qui se trouve sous la zone de l'explosion. Dans cette zone de dépôt (source), les rayons gamma de l'explosion nucléaire produisent des électrons «Compton» par interaction avec les molécules de l'air; ces électrons sont déviés d'une manière cohérente par le champ magnétique terrestre. Ces courants d'électrons transverses produisent des champs électriques transverses se propageant vers le bas, à la surface de la terre. Ce phénomène conduit à la génération d'une onde IEMN-HA initiale (figure 4) qui est caractérisée par un champ électrique crête important (des dizaines de kilovolts par mètre), un temps de montée rapide (quelques nanosecondes), une durée d'impulsion courte (jusqu'à environ 100 ns) et une impédance d'onde de 377 Ω . L'onde IEMN-HA initiale expose aux radiations la surface de la terre située dans la «ligne de vision» de l'explosion, elle est polarisée transversalement par rapport au sens de propagation et au champ géomagnétique local, dans les limites de la zone de dépôt. Pour les régions septentrionales et australes (c'est-à-dire éloignées de l'équateur), ceci signifie que le champ électrique est principalement horizontal (polarisation horizontale).

- 4.17 NEMP:** Nuclear EMP; all types of EMP produced by a nuclear explosion.
- 4.18 polarization:** Orientation of the electric field vector.
- 4.19 prompt radiation:** Nuclear energy which leaves an explosion within 1 μ s.
- 4.20 SREMP:** Source region EMP; the NEMP produced in any region where prompt radiation is also present producing currents (sources) in the air.
- 4.21 tangent point:** Any point on the earth's surface where a line drawn from the burst is tangent to the earth.
- 4.22 tangent radius:** Distance measured along the earth's surface between ground zero and any tangent point.
- 4.23 vertical polarization:** An electromagnetic wave is vertically polarized if the electric field vector is in the incidence plane and the magnetic field vector is perpendicular to the incidence plane and thus parallel to the ground plane (figure 1). (This type of polarization is also called parallel or transverse magnetic (TM).)

5 Description of HEMP environment, radiated parameters

5.1 High-altitude bursts

When a nuclear weapon detonates at high altitudes, the prompt radiation (x-rays, gamma rays and neutrons) deposit their energy in the dense air below the burst. In this deposition (source) region, the gamma rays of the nuclear explosion produce Compton electrons by interactions with the molecules of the air. These electrons are deflected in a coherent manner by the earth's magnetic field. These transverse electron currents produce transverse electric fields which propagate down to the earth's surface. This mechanism describes the generation of the early-time HEMP (figure 4) which is characterized by a large peak electric field (tens of kilovolts per meter), a fast rise time (nanoseconds), a short pulse duration (up to about 100 ns) and a wave impedance of 377 Ω . The early-time HEMP exposes the earth's surface within line-of-sight of the burst and is polarized transverse to the direction of propagation and to the local geomagnetic field within the deposition region. In the northern and southern latitudes (i.e. far from the equator) this means that the electric field is predominantly oriented horizontally (horizontal polarization).



IEC 119/96

Figure 4 – Représentation schématique de l'onde IEMN-HA initiale lors d'une explosion à haute altitude

Suivant immédiatement l'onde IEMN-HA transitoire initiale, les rayons gamma dispersés et les rayons gamma non-élastiques, provenant d'armes à neutrons, créent une ionisation supplémentaire produisant la seconde partie (IEM intermédiaire) du signal IEMN-HA. Ce second signal est de l'ordre de 10 V/m à 100 V/m et peut apparaître dans un intervalle de temps allant de 100 ns à quelques dizaines de millisecondes.

Le dernier type d'onde IEMN-HA appelé IEM-HA finale, aussi appelée IEMN-HA magnétohydrodynamique (ou IEMN-HA-MHD) est produit à partir de la même explosion nucléaire. L'impulsion IEMN-HA finale est caractérisée par un champ électrique de faible amplitude (des dizaines de millivolts par mètre), un temps de montée lent (calculé en secondes) et une durée d'impulsion longue (des centaines de secondes). Ces champs induisent, dans les réseaux électriques et téléphoniques, des courants du même type que ceux associés aux orages magnétiques fréquemment observés au-dessus du Canada et des régions nordiques. Les impulsions IEMN-HA finales peuvent être à l'origine d'interférences sur les lignes de transmission et de distribution et induire des courants produisant des harmoniques et des déséquilibres de phases susceptibles d'endommager des composants importants des réseaux (tels que les transformateurs).

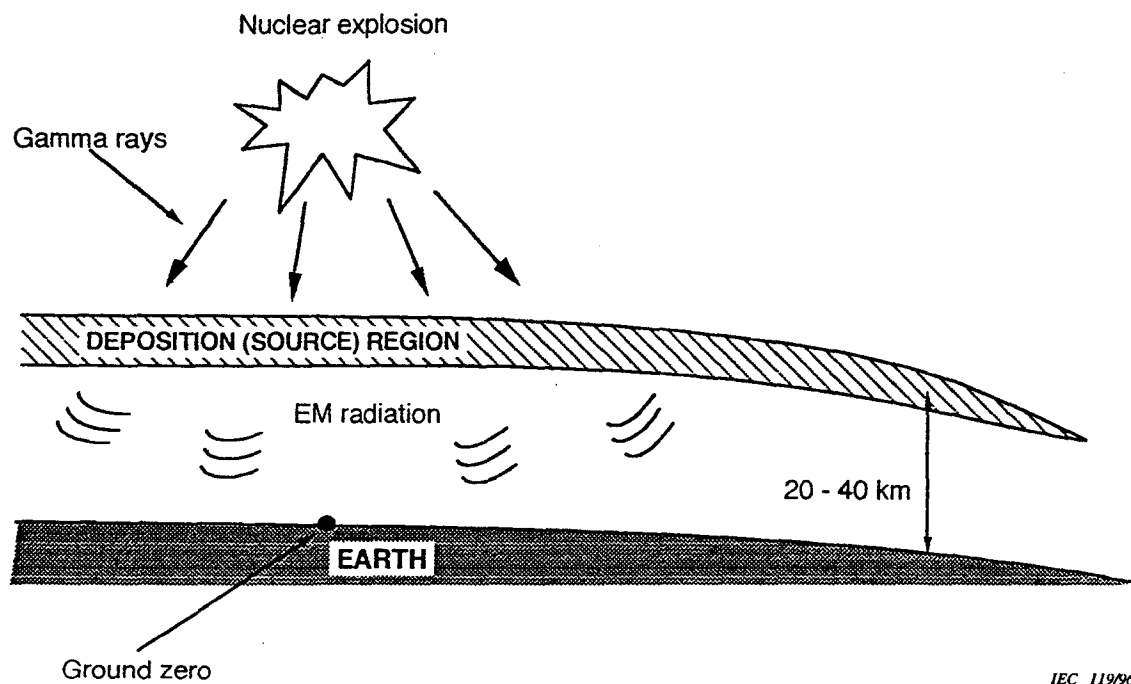


Figure 4 – Schematic representation of the early-time HEMP from a high-altitude burst

Immediately following the initial fast HEMP transient, scattered gamma rays and inelastic gammas from weapon neutrons create additional ionization resulting in the second part (intermediate time) of the HEMP signal. This second signal is on the order of 10 V/m to 100 V/m and can occur in a time interval from 100 ns to tens of milliseconds.

The last type of HEMP, late-time HEMP, also designated magnetohydrodynamic EMP (MHD-EMP) is generated from the same nuclear burst. Late-time HEMP is characterized by a low amplitude electric field (tens of millivolts per meter), a slow rise time (seconds), and a long pulse duration (hundreds of seconds). These fields will cause similar induction currents in power lines and telephone networks as those associated with magnetic storms often observed in Canada and the Nordic countries. Late-time HEMP can interact with transmission and distribution lines to induce currents that result in harmonics and phase imbalances which can potentially damage major power system components (such as transformers).

5.2 Extension spatiale de l'onde IEMN-HA à la surface de la terre

L'importance du champ électrique observé à la surface de la terre à partir d'une explosion à haute altitude peut varier d'une façon significative (en amplitude crête, temps de montée, durée et polarisation) sur une vaste zone touchée par l'onde IEMN-HA suivant la hauteur de l'explosion et sa puissance (voir figure 4). Par exemple dans l'hémisphère nord, la pointe maximale du champ électrique $E_{\max}$ se produit juste au sud du point zéro et peut s'élever à 50 kV/m selon, par exemple, la hauteur de l'explosion et la puissance de l'arme. La figure 5 montre le rayon de tangence de l'onde IEMN-HA initiale en fonction de l'altitude d'explosion (ADE). Par exemple, pour une explosion à une altitude de 50 km, la zone au sol touchée aurait un rayon de 800 km et, pour une altitude de 500 km, le rayon de tangence serait d'environ 2 500 km. La figure 6 montre la variation des pointes maximales des champs IEMN-HA au-dessus des zones terrestres exposées.

5.3 Variation de l'onde IEMN-HA avec le temps

Cette section donne des exemples de formes d'ondes du champ électrique représentant les environnements soumis à des ondes IEMN-HA initiales, intermédiaires et finales.

5.3.1 Forme de l'onde initiale

Les courbes A, B et C de la figure 7 illustrent des variations d'ondes IEMN-HA initiales, selon les positions indiquées à la figure 6. L'importante variation des formes d'ondes incidentes et l'impossibilité de prévoir le lieu de l'explosion nous ont conduit à établir, pour l'impulsion IEMN-HA, une forme d'onde générale qui comporte le court temps de montée de l'emplacement proche du point zéro et la forte amplitude de l'onde IEMN-HA dans la région d'amplitude crête maximale. L'enveloppe de toutes les impulsions, y compris le long temps de descente dans la région de tangence constituerait un cas extrême. En utilisant l'enveloppe des transformées de Fourier (spectres de fréquences) on obtient une forme d'onde plus réaliste qui est l'impulsion de 2,5/23 ns recommandée dans la présente section de la CEI 1000-2 pour les utilisations civiles.

5.2 *Spatial extent of HEMP on the earth's surface*

The strength of the electric field observed at the earth's surface from a high-altitude explosion may vary significantly (in peak amplitude, rise time, duration and polarization) over the large area affected by the HEMP depending on burst height and yield (see figure 4). For example in the northern hemisphere, the maximum peak electric field identified as $E_{\max}$ occurs south of ground zero and can be as high as 50 kV/m, depending e.g. upon the height of burst and the weapon yield. Figure 5 shows the early-time HEMP tangent radius as a function of the height of burst (HOB). For an explosion at an altitude of 50 km, for example, the affected area on the ground would have a radius of 800 km and for an altitude of 500 km, the tangent radius would be about 2 500 km. Figure 6 describes the variation of the peak HEMP fields over the exposed area of the earth.

5.3 *HEMP time dependence*

In this subclause, electric field time waveforms are suggested to represent the early-time, intermediate-time, and late-time HEMP environments.

5.3.1 *Early-time HEMP waveform*

Examples of the variation of early-time HEMP waveforms are shown by the three waveforms A, B and C in figure 7 with the curves referenced to positions noted in figure 6. Since the incident waveshapes vary greatly and there is no way to predict the burst location, a generalized waveform is constructed for the HEMP that maintains the short rise time of the near-ground-zero location and the large amplitude of the HEMP in the region of maximum peak amplitude. The envelope of all pulses, including the long fall time in the tangent region, would provide an extreme case. A more realistic waveform, constructed from the envelope of the Fourier transforms (frequency spectra) of all of them, is the 2,5/23 ns pulse recommended in this section of IEC 1000-2 for civilian use.

$$R_T \approx 110\sqrt{ADE \text{ (km)}} \text{ pour } ADE \leq 500 \text{ km}$$

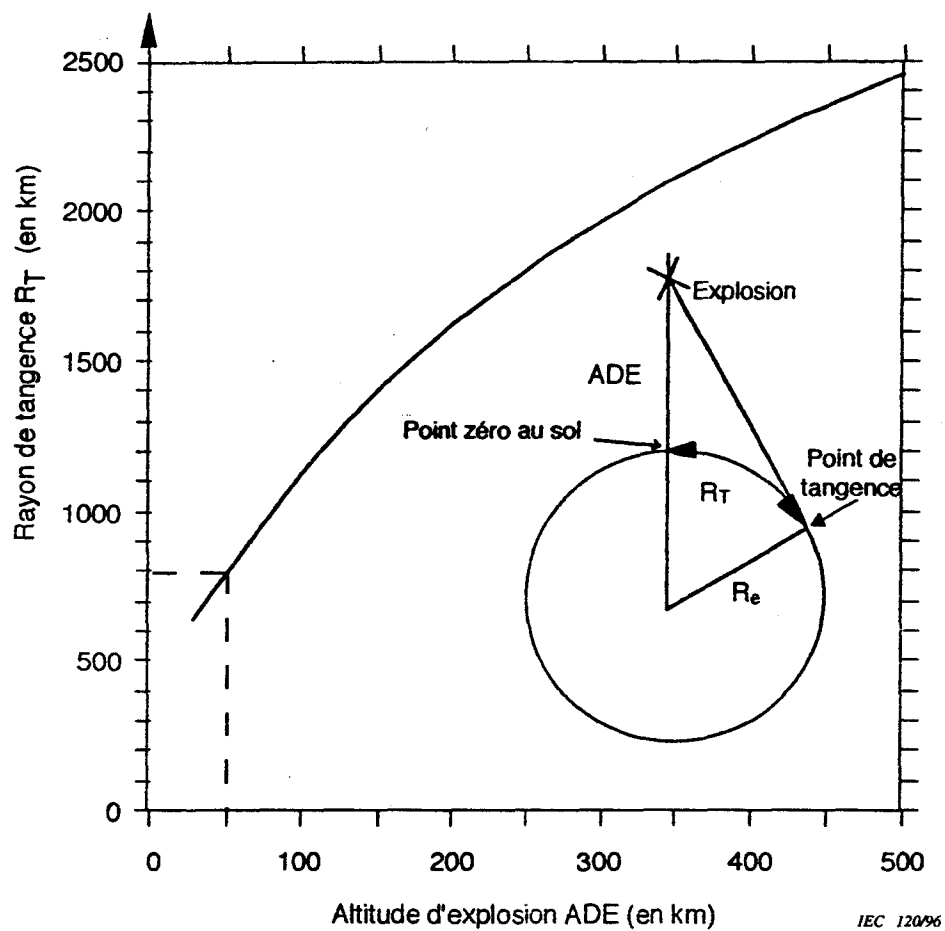


Figure 5 – Rayon de tangence de l'onde IEMN-HA en fonction de l'altitude de l'explosion (ADE)

$$R_T \approx 110\sqrt{HOB \text{ (km)}} \text{ for } HOB \leq 500 \text{ km}$$

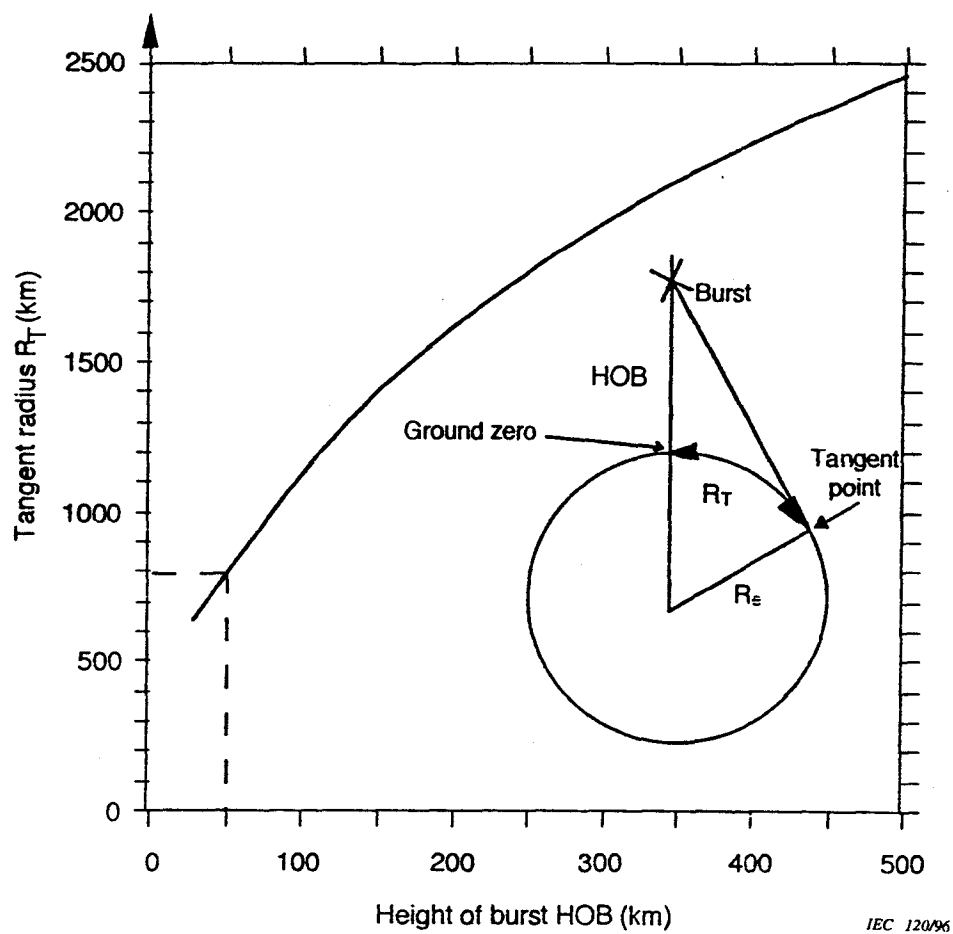
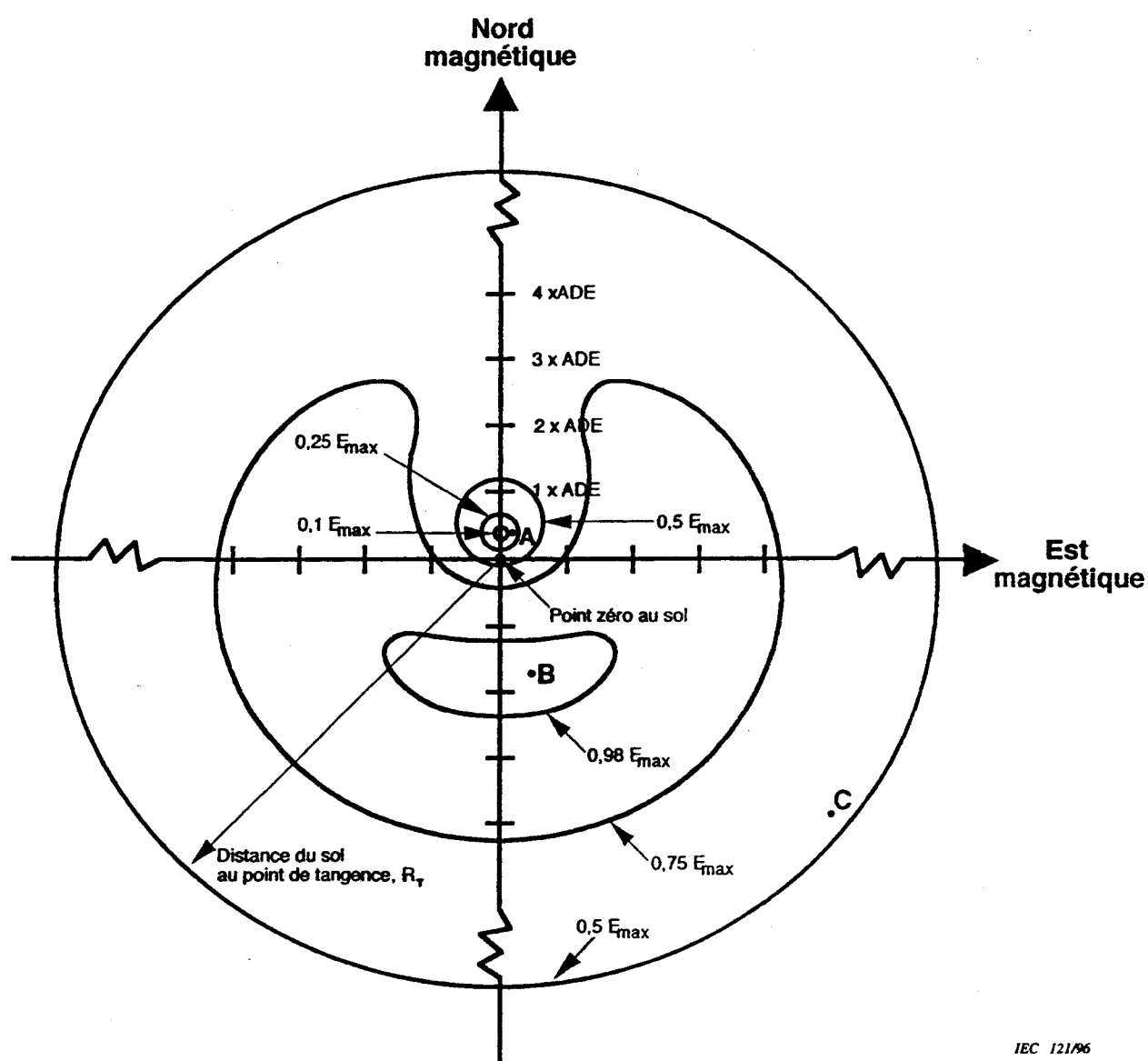
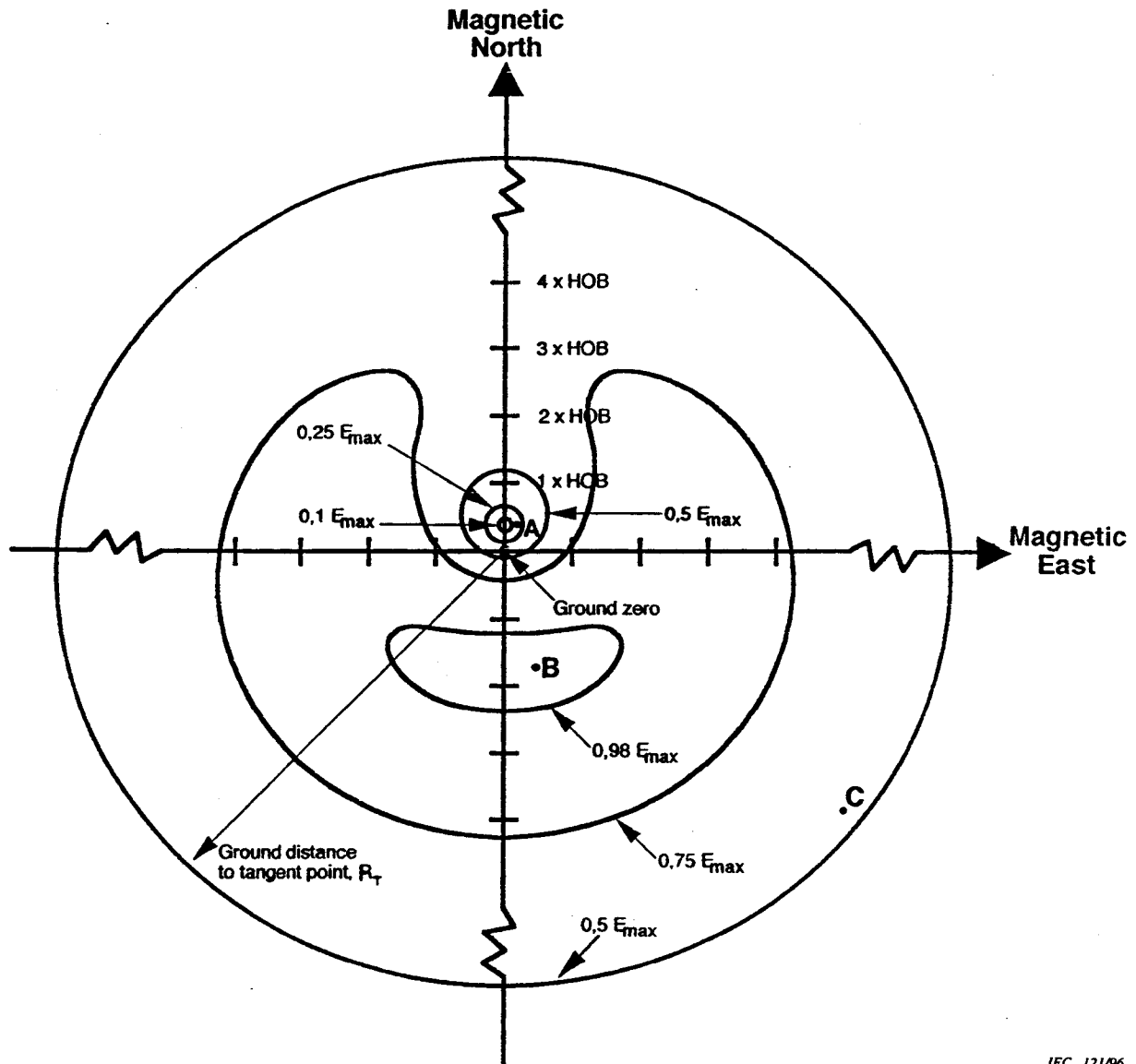


Figure 5 – HEMP tangent radius as a function of height of burst (HOB)



IEC 121/96

Figure 6 – Variations caractéristiques des pointes des champs électriques à la surface de la terre pour des altitudes d'explosion comprises entre 100 km et 500 km et pour des points zéro au sol compris entre 30° et 60° de latitude nord. Ces données concernent des explosions de quelques centaines de kilotonnes ou plus.



IEC 121/96

Figure 6 – Typical variations in peak electric fields on the earth's surface for burst altitudes between 100 km and 500 km and for ground zero between 30° and 60° northern latitude. The data are applicable for yields of a few hundred kilotons or more.

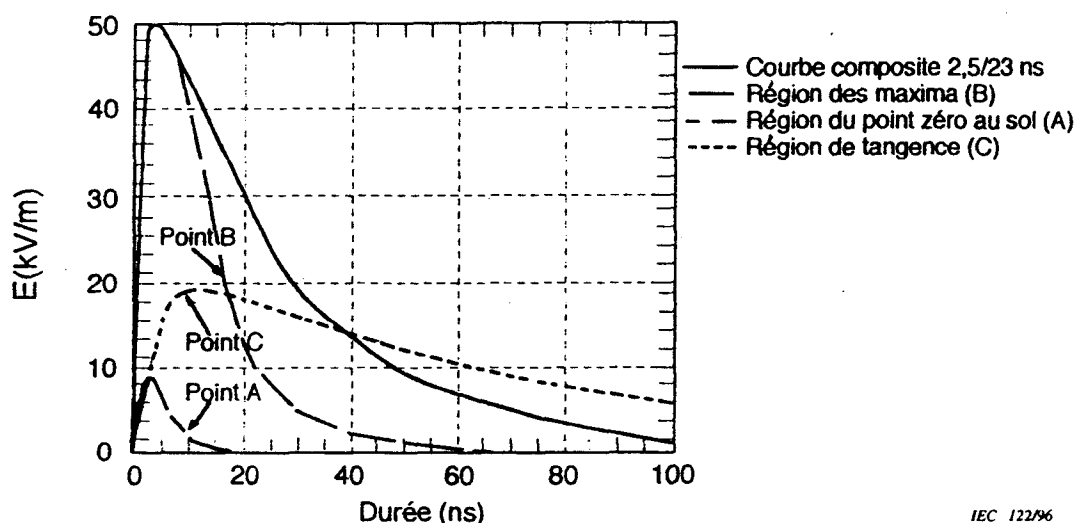


Figure 7 – Différentes formes d'onde pour les trois cas typiques représentés à la figure 6 (points A, B, C) et la courbe composite adaptée

Dans tous ces cas, le comportement initial du champ électrique dans l'espace libre est donné par:

$$E_1(t) = \begin{cases} 0 & \text{lorsque } t \leq 0 \\ E_{01} \cdot k_1 (e^{-a_1 t} - e^{-b_1 t}) & \text{lorsque } t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{01} = 50\,000 \text{ V/m}$$

$$a_1 = 4 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$$

$$b_1 = 6 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$$

$$k_1 = 1,3$$

où

E_1 est donné en volts par mètre;

t est exprimé en secondes.

Les figures 8a et 8b montrent des courbes correspondant à l'équation (1). La figure 8a montre les caractéristiques de la montée de l'impulsion, la figure 8b celles de descente de l'impulsion. Cette forme d'onde essayant d'envelopper les caractéristiques de n'importe quelle forme d'onde IEMN-HA initiale, est considérée comme le cas normalisé. L'impulsion a une amplitude crête de 50 kV/m, un temps de montée de 10 % à 90 % de 2,6 ns – 0,1 ns = 2,5 ns, un temps d'établissement de la valeur crête de 4,8 ns, et une largeur d'impulsion à mi-hauteur de 23 ns. La fluence énergétique de l'onde initiale est de 0,114 J/m².

Il est à noter que l'onde IEMN-HA initiale représente un champ incident et que les réflexions sur le sol doivent être traitées séparément (voir 5.7). Le champ électrique incident est polarisé perpendiculairement au sens de propagation et au champ magnétique terrestre. Etant donné cette relation, la composante locale verticale du champ électrique incident de l'onde IEMN-HA initiale est à son maximum à l'est et à l'ouest magnétiques de l'explosion au point de tangence de la terre. Vers le nord et le sud magnétiques la composante locale verticale est zéro. Ne sachant pas où l'explosion aura lieu par rapport à un observateur donné, nous pouvons définir les proportions des composantes verticale et horizontale du champ électrique de la façon suivante:

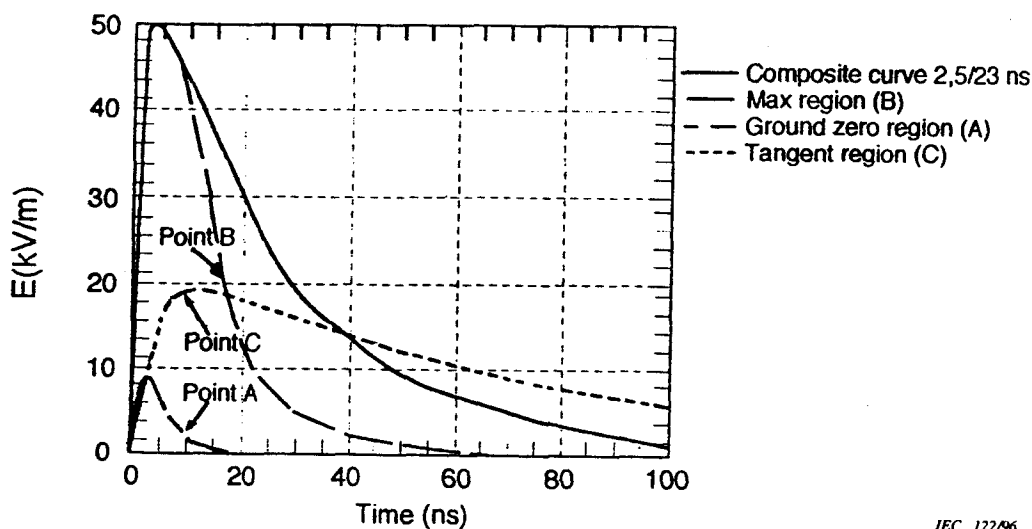


Figure 7 – Different waveforms for three typical cases indicated in figure 6 (points A, B, C) and the composite curve fit

For these cases, the electric field early-time behaviour in free space of this wave is given by:

$$E_1(t) = \begin{cases} 0 & \text{when } t \leq 0 \\ E_{01} \cdot k_1 (e^{-a_1 t} - e^{-b_1 t}) & \text{when } t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{01} = 50\,000 \text{ V/m}$$

$$a_1 = 4 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$$

$$b_1 = 6 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$$

$$k_1 = 1,3$$

where

E_1 is given in volts per meter;

t is in seconds.

A plot of equation (1) is given in figures 8a and 8b. Figure 8a shows the pulse rise characteristics. The pulse decay behaviour is given in figure 8b. Because this waveform attempts to bound features of any early-time HEMP waveform, it is considered a standard waveform. The pulse has a peak amplitude of 50 kV/m, a 10 % to 90 % rise time of 2,6 ns – 0,1 ns = 2,5 ns, a time to peak of 4,8 ns, and a pulse width at half maximum of 23 ns. The energy fluence of the early-time waveform is 0,114 J/m².

It should be emphasized that the early-time HEMP is an incident field, and reflections from the ground shall be treated separately (see 5.7). The incident electric field is polarized perpendicular to the direction of propagation and the earth's magnetic field. Because of this relationship, the local vertical component of the incident early-time HEMP electric field is maximum to the magnetic east and west of the burst at the Earth's tangent point. Toward the magnetic north and south, the local vertical electric field component is zero. Since it is not known where the burst will be located relative to a given observer, the vertical and horizontal electric field component fractions can be defined as:

$$\begin{aligned} f_v &\leq \cos \theta_{\text{dip}} \\ f_h &\geq \sin \theta_{\text{dip}} \\ f_v^2 + f_h^2 &= 1 \end{aligned} \quad (2)$$

La figure 8c donne les informations nécessaires à la définition de θ_{dip} .

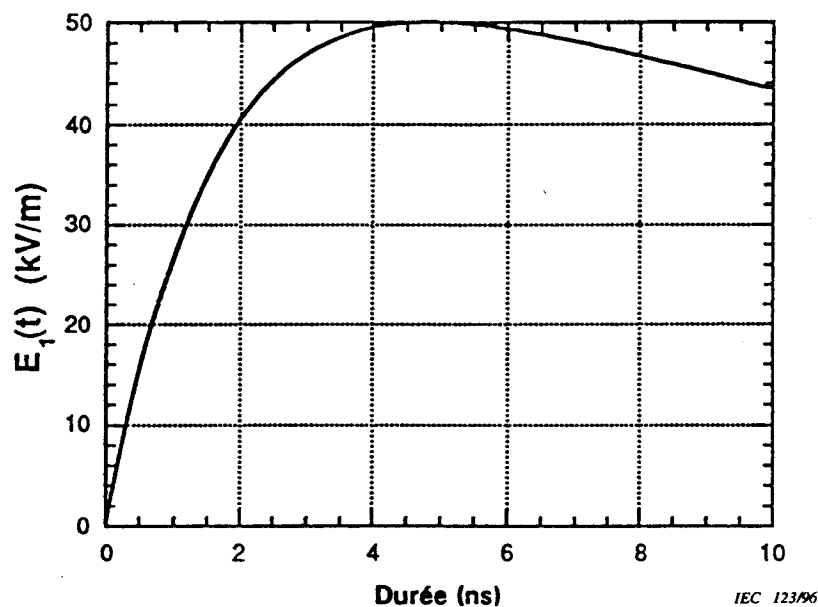


Figure 8a – De 0 à 10 ns (caractéristique de montée de l'impulsion)

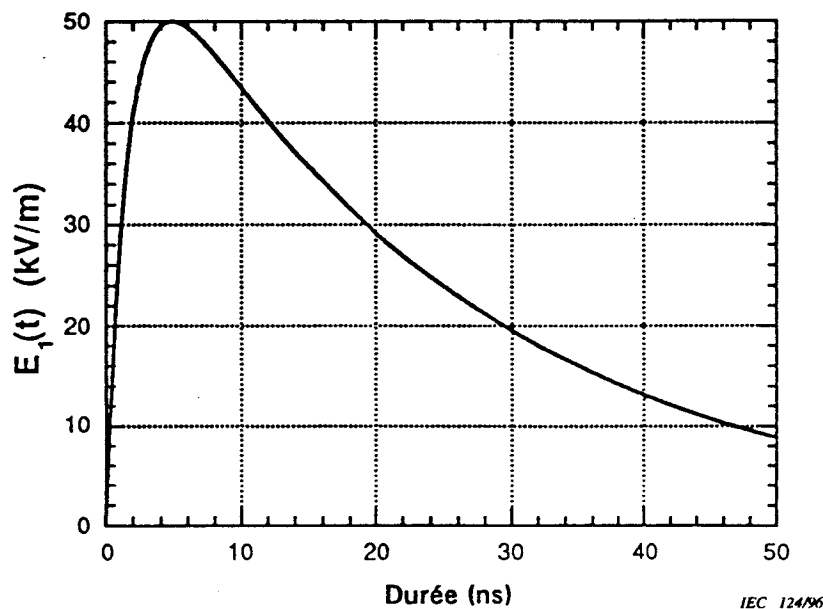


Figure 8b – De 0 à 50 ns (comportement de descente de l'impulsion)

$$f_v \leq \cos \theta_{\text{dip}}$$

$$f_h \geq \sin \theta_{\text{dip}}$$

$$f_v^2 + f_h^2 = 1$$

(2)

Figure 8c provides information to establish θ_{dip} .

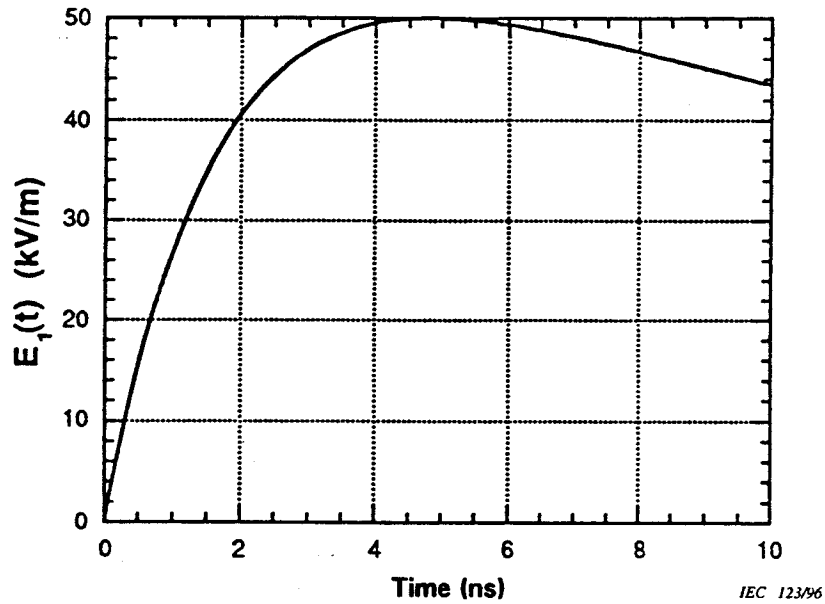


Figure 8a – 0-10 ns (pulse rise characteristic)

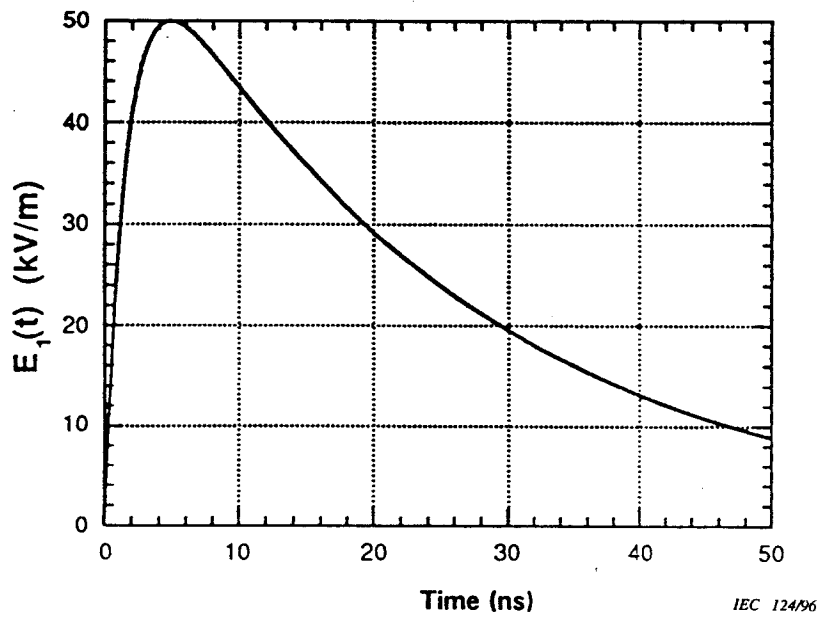
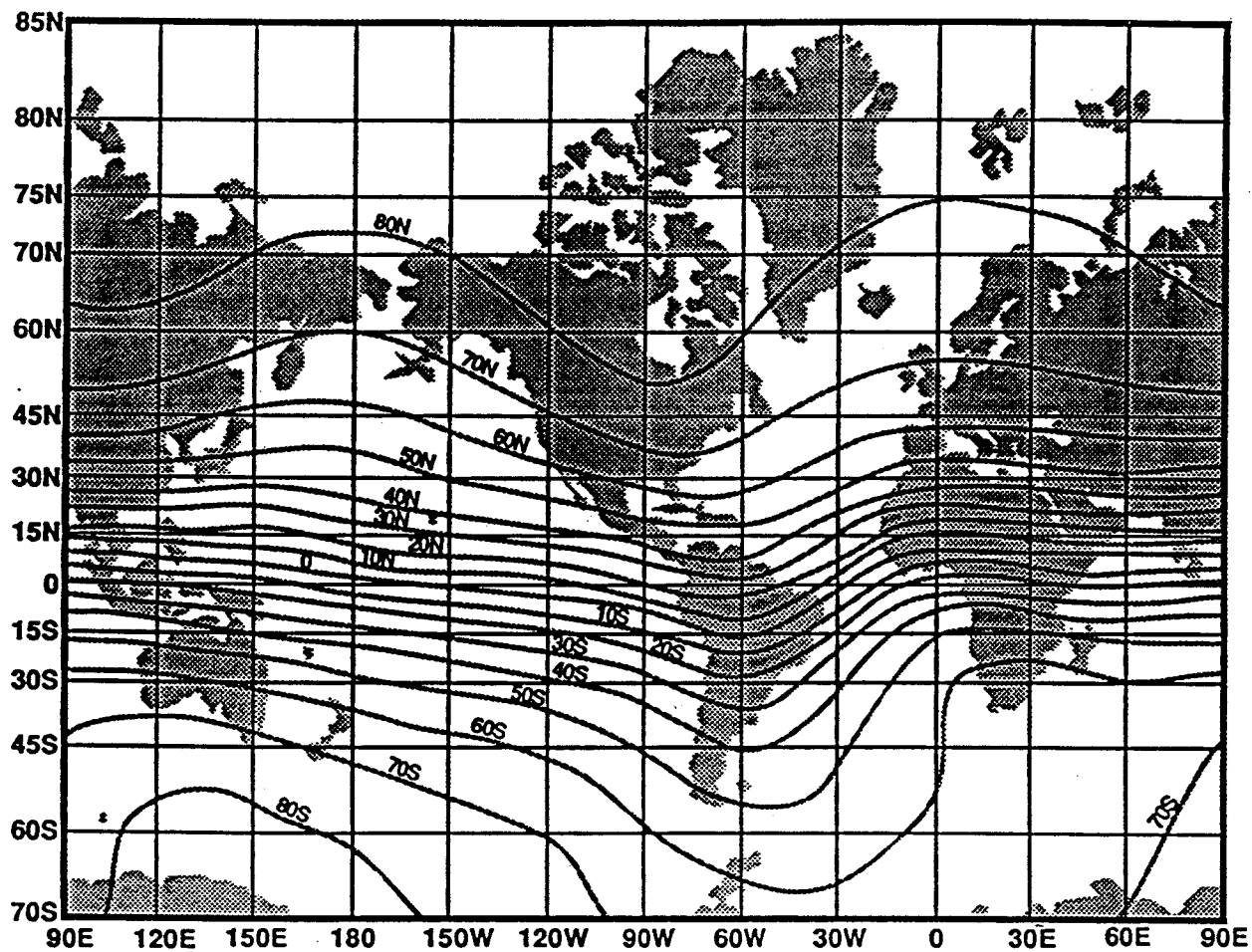


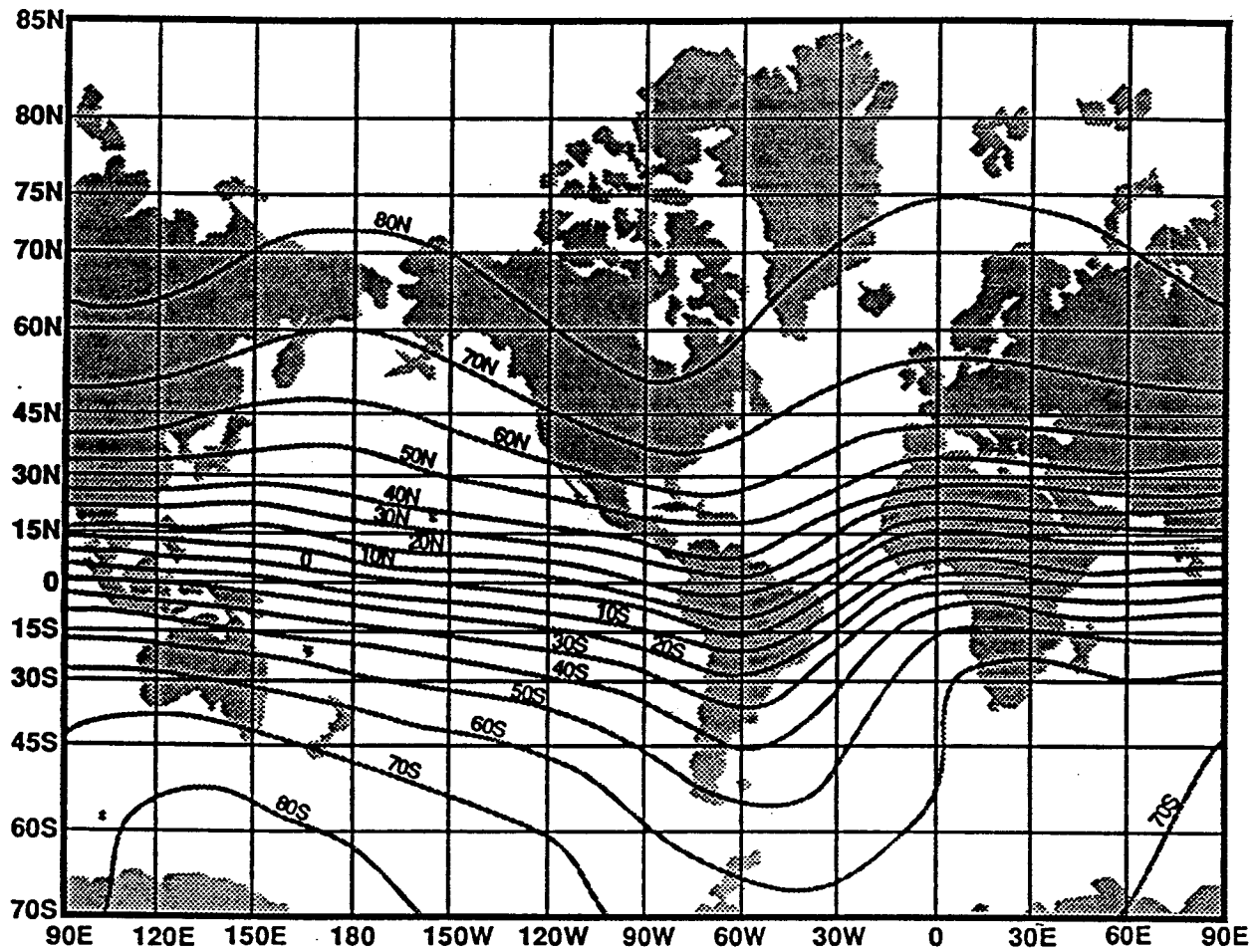
Figure 8b – 0-50 ns (pulse decay behaviour)



IEC 125/96

Figure 8c – Angle d'inclinaison, θ_{dip} , du champ magnétique terrestre

Figure 8 – Onde IEMN-HA initiale (composante du champ électrique)



IEC 125/96

Figure 8c – Dip angle, θ_{dip} , of the earth's magnetic field

Figure 8 – HEMP early-time behaviour (electric field component)

5.3.2 Forme d'onde IEMN-HA intermédiaire

L'impulsion IEMN-HA intermédiaire se caractérise par une amplitude de 10 V/m à 100 V/m pour des durées comprises entre environ 0,1 μ s et 0,01 s. Le champ comporte des similitudes avec l'impulsion IEMN-HA initiale, car il est défini comme étant un rayonnement incident dont la polarisation est similaire à celle de l'impulsion IEMN-HA initiale. Après réflexion sur la terre, le champ électrique est orienté principalement verticalement avec une petite composante horizontale.

Le comportement intermédiaire, dans l'espace libre, du champ électrique correspondant est donné par:

$$E_2(t) = \begin{cases} 0 & \text{lorsque } t \leq 0 \\ E_{02} \cdot k_2 (e^{-a_2 t} - e^{-b_2 t}) & \text{lorsque } t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$E_{02} = 100 \text{ V/m}$$

$$a_2 = 1000 \text{ s}^{-1}$$

$$b_2 = 6 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$$

$$k_2 = 1$$

où

E_2 est donné en volts par mètre;

t est exprimé en secondes.

Les courbes de la figure 10 illustrent cette forme d'onde. Cette forme d'onde a une amplitude crête de 100 V/m et une largeur d'impulsion à mi-hauteur de 693 μ s. La fluence énergétique de l'onde est de 0,0133 J/m²

5.3.3 Forme d'onde IEMN-HA finale

La section finale de l'onde IEMN-HA vient de l'effet magnétohydrodynamique (MHD) et engendre des champs électriques de dizaines de millivolts par mètre dans le sol pendant des durées comprises entre 1 s et 1 000 s. Le champ électrique induit est orienté horizontalement.

Le comportement de la forme d'onde finale du champ électrique dans la terre pour une conductivité du sol en profondeur (de l'ordre de 100 km) de $\sigma_g = 10^{-4}$ S/m est donné par:

$$E_3(t) = E_i(t) - E_j(t) \quad (4)$$

où

$$E_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{lorsque } \tau \leq 0 \\ E_{0i} \cdot k_i (e^{-a_i \tau} - e^{-b_i \tau}) & \text{lorsque } \tau > 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\tau = t - 1$$

$$E_{0i} = 0,04 \text{ V/m}$$

$$a_i = 0,02 \text{ s}^{-1}$$

$$b_i = 2 \text{ s}^{-1}$$

$$k_i = 1,058$$

5.3.2 Intermediate-time HEMP waveform

The intermediate-time HEMP is characterized by an amplitude of 10 V/m to 100 V/m for times between approximately 0,1 μ s and 0,01 s. The field has similarity to the early-time HEMP in terms of being defined as an incident radiation field with the same polarization as the early-time HEMP. After earth reflection, the electric field will be oriented mainly vertically with a small horizontal component.

The electric field intermediate-time behaviour in free space of this wave is given by:

$$E_2(t) = \begin{cases} 0 & \text{when } t \leq 0 \\ E_{02} \cdot k_2 (e^{-a_2 t} - e^{-b_2 t}) & \text{when } t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$E_{02} = 100 \text{ V/m}$$

$$a_2 = 1000 \text{ s}^{-1}$$

$$b_2 = 6 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$$

$$k_2 = 1$$

where

E_2 is given in volts per meter;

t is in seconds.

A plot of this waveform is shown in figure 10. This waveform has a peak amplitude of 100 V/m and a pulse width at half maximum of 693 μ s. The energy fluence of the wave is 0,0133 J/m².

5.3.3 Late-time HEMP waveform

The late-time portion of the HEMP waveform is produced by the magnetohydrodynamic (MHD) effect and produces electric fields in the earth of tens of millivolts per meter for times between 1 s and 1000 s. The induced electric field is oriented horizontally.

The electric field late-time waveform in the earth for a deep ground conductivity (to a depth of 100 km) of $\sigma_g = 10^{-4}$ S/m is given by:

$$E_3(t) = E_i(t) - E_j(t) \quad (4)$$

where

$$E_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{when } \tau \leq 0 \\ E_{0i} \cdot k_i (e^{-a_i \tau} - e^{-b_i \tau}) & \text{when } \tau > 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\tau = t - 1$$

$$E_{0i} = 0,04 \text{ V/m}$$

$$a_i = 0,02 \text{ s}^{-1}$$

$$b_i = 2 \text{ s}^{-1}$$

$$k_i = 1,058$$

et

$$E_I(t) = \begin{cases} 0 & \text{lorsque } \tau \leq 0 \\ E_{0j} \cdot k_j (e^{-a_j \tau} - e^{-b_j \tau}) & \text{lorsque } \tau > 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\tau = t - 1$$

$$E_{0j} = 0,01326 \text{ V/m}$$

$$a_j = 0,015 \text{ s}^{-1}$$

$$b_j = 0,02 \text{ s}^{-1}$$

$$k_j = 9,481$$

Le champ est exprimé en volts par mètre, les durées (t et τ) sont exprimées en secondes. La figure 9 représente une telle courbe, où σ_g est la conductivité du sol. Pour d'autres conductivités du sol, $E_3 \sim \sigma_g^{-1/2}$.

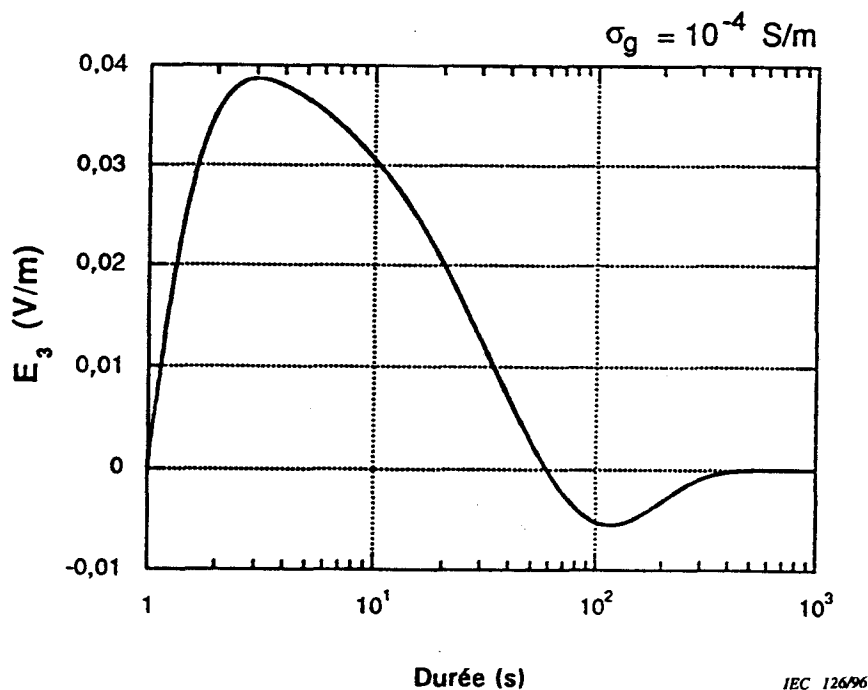


Figure 9 – Impulsion IEMN-HA finale standardisée

La forme d'onde résultante présente un champ électrique crête de 38 mV/m, un temps de montée d'environ 0,9 s, une largeur d'impulsion positive de 20 s et négative de 130 s.

and

$$E_j(t) = \begin{cases} 0 & \text{when } \tau \leq 0 \\ E_{0j} \cdot k_j (e^{-a_j \tau} - e^{-b_j \tau}) & \text{when } \tau > 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\tau = t - 1$$

$$E_{0j} = 0,01326 \text{ V/m}$$

$$a_j = 0,015 \text{ s}^{-1}$$

$$b_j = 0,02 \text{ s}^{-1}$$

$$k_j = 9,481$$

The field is defined in volts per meter and the times (t and τ) are in seconds. A plot of this waveform is shown in figure 9 where σ_g is the ground conductivity. For other ground conductivities, $E_3 \sim \sigma_g^{-1/2}$.

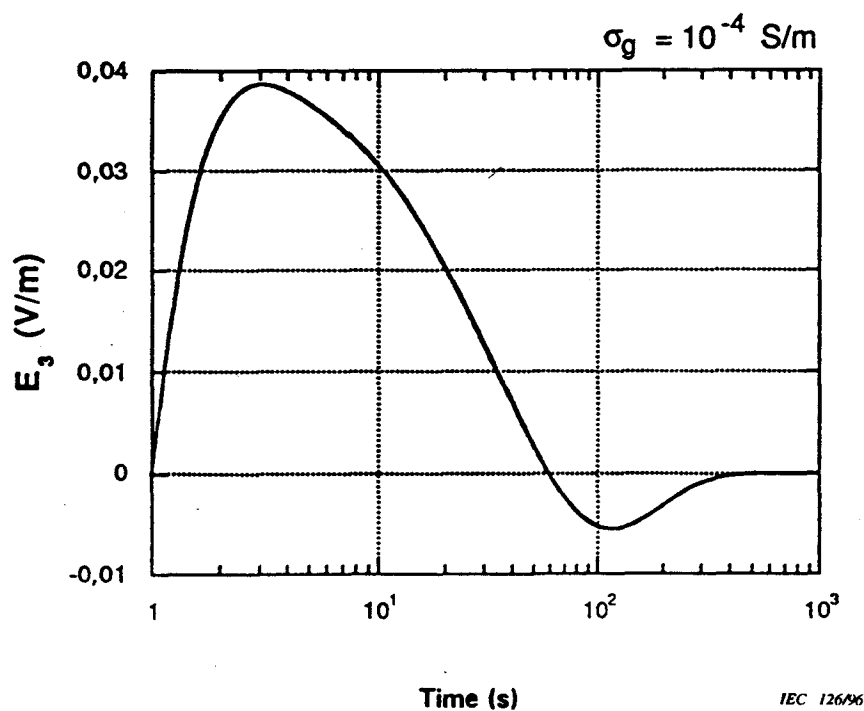


Figure 9 – Standard late-time HEMP waveform

The resultant waveform has a peak electric field of 38 mV/m, a rise time of approx. 0,9 s, a positive pulse width of 20 s and a negative pulse width of 130 s.

5.3.4 Forme d'onde temporelle IEMN-HA standard complète en champ électrique

La figure 10 représente la variation dans le temps des trois composantes de l'impulsion IEMN-HA. Il est à noter que $E_1(t)$ et $E_2(t)$ sont des ondes incidentes de polarisation identique, tandis que $E_3(t)$ est un champ électrique induit dans le sol, de polarisation horizontale.

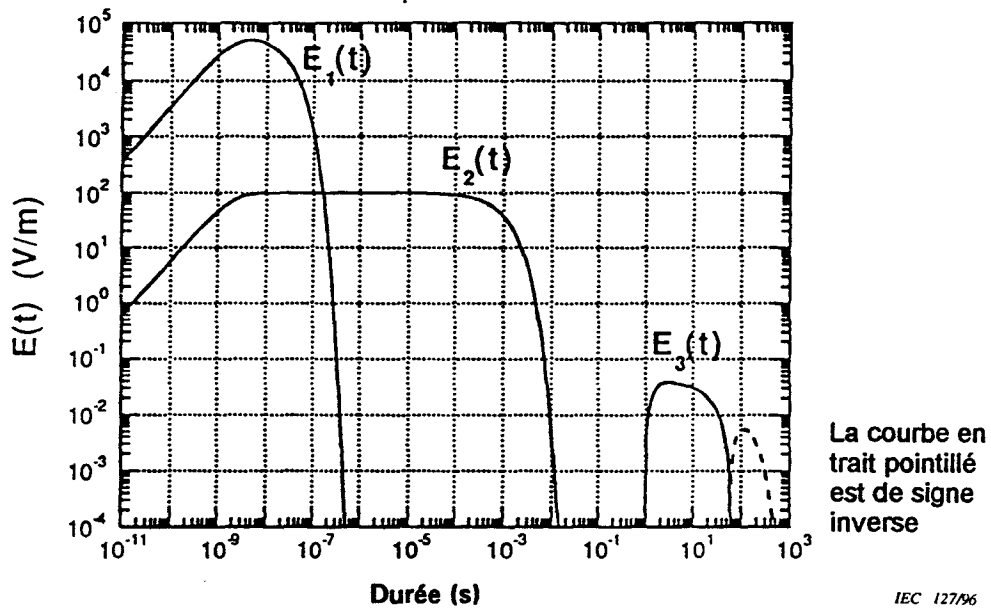


Figure 10 – Forme d'onde temporelle IEMN-HA standard complète

5.4 Composante du champ magnétique

Pour les fréquences f supérieures à 1,6 kHz et pour une distance source/objet d'au moins 30 km (altitude de la région source, voir figure 4), le critère suivant bien connu de champ lointain se trouve vérifié:

$$r \geq \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c}{2\pi f} \quad (7)$$

où

λ est la longueur d'onde;

c est la vitesse de la lumière.

Dans ce cas, le critère se trouve satisfait pour des durées inférieures à 100 μ s. Les formes d'ondes illustrées par la figure 10 peuvent donc être converties en champs magnétiques en divisant les champs électriques par $Z_0 = 120 \pi \Omega$ pour des durées inférieures à 100 μ s.

5.3.4 The complete standard HEMP electric field time waveform

Figure 10 shows the time behaviour of all three contributions to the HEMP. It is emphasized that $E_1(t)$ and $E_2(t)$ are incident waves with identical polarization while $E_3(t)$ is an induced electric field in the earth with horizontal orientation.

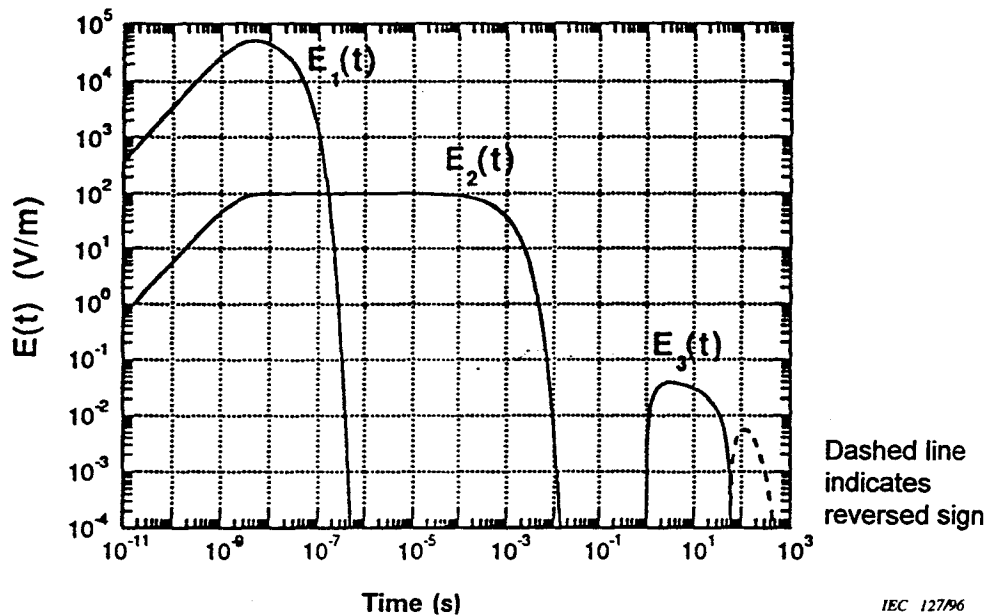


Figure 10 – Complete standard HEMP time waveform

5.4 Magnetic field component

For frequencies f above 1,6 kHz and for a distance from source to object of at least 30 km (height of source region, see figure 4), the following well-known far-field criterion is fulfilled:

$$r \geq \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c}{2\pi f} \quad (7)$$

where

λ is the wavelength;

c denotes the velocity of light.

In this case, the criterion is satisfied for times less than 100 μ s. Therefore the waveforms shown in figure 10 can be converted to magnetic fields by dividing the electric fields by $Z_0 = 120 \pi \Omega$ for times less than 100 μ s.

Ceci signifie que l'équation (1) peut être utilisée pour calculer le champ magnétique incident crête:

$$H_{01} = \frac{E_{01}}{Z_0} = \frac{50\,000}{120\pi} = 132,6 \text{ A/m} \quad (8)$$

où

E_{01} est exprimé en volts/mètre;

Z_0 est exprimé en ohms;

H_{01} est exprimé en ampères/mètre.

5.5 Amplitude et spectre de fluence

De nombreux collecteurs importants d'énergie IEMN-HA sont particulièrement sélectifs en fréquence. Il est donc important de déterminer la répartition d'énergie IEMN-HA dans le domaine des fréquences. La transformée de Fourier de la forme d'onde temporelle généralisée du champ électrique IEMN-HA est utilisée pour définir la contribution relative des fréquences la constituant:

$$\tilde{E}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (9)$$

Pour l'onde temporelle analytique générale utilisée dans les équations (1), (3), (5) et (6), la transformée de Fourier est analytique, elle est donnée par:

$$\tilde{E}_m(f) = \frac{E_{om} \cdot k_m (b_m - a_m)}{(j2\pi f + a_m)(j2\pi f + b_m)} \cdot e^{-j\varphi} \quad (10)$$

où

m peut être 1, 2, i, j;

φ représente un déphasage ($\varphi = 0$ pour E_1 et E_2 , $\varphi = 2\pi f$ pour E_i et E_j).

La figure 11 représente le spectre de densité d'amplitude du champ électrique IEMN à haute altitude, chacune des composantes étant montrée séparément.

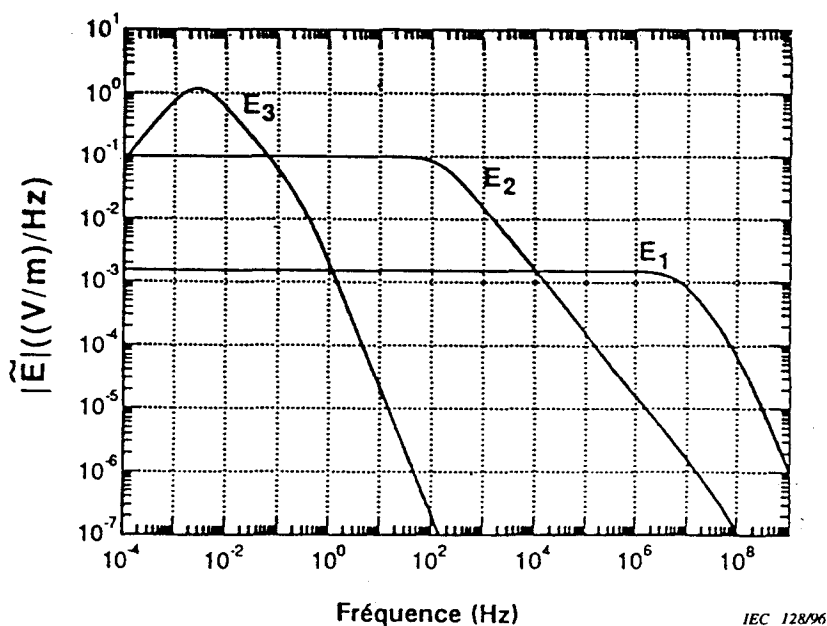


Figure 11 – Spectre d'amplitude de chacune des composantes IEMN-HA

This means that equation (1) can be used to calculate the peak incident magnetic field:

$$H_{01} = \frac{E_{01}}{Z_0} = \frac{50\,000}{120\pi} = 132,6 \text{ A/m} \quad (8)$$

where

E_{01} is given in volts/meter;

Z_0 is given in ohms;

H_{01} is given in amperes/meter.

5.5 HEMP amplitude and energy fluence spectrum

Many of the significant HEMP energy collectors are particularly frequency selective. It is thus important to find the HEMP energy distribution in the frequency domain. The Fourier transform of the generalized HEMP electric-field time waveform is used to find the relative contribution of the constituent frequencies:

$$\tilde{E}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (9)$$

For the general analytic time waveform used in equations (1), (3), (5), and (6), the Fourier transform is analytic and is given by:

$$\tilde{E}_m(f) = \frac{E_{om} \cdot k_m (b_m - a_m)}{(j2\pi f + a_m)(j2\pi f + b_m)} \cdot e^{-j\varphi} \quad (10)$$

where

m may be 1, 2, i or j;

φ is a phase shift ($\varphi = 0$ for E_1 and E_2 , $\varphi = 2\pi f$ for E_i and E_j).

Figure 11 shows the amplitude density spectrum of the high-altitude EMP electric field. Each of the components is shown separately.

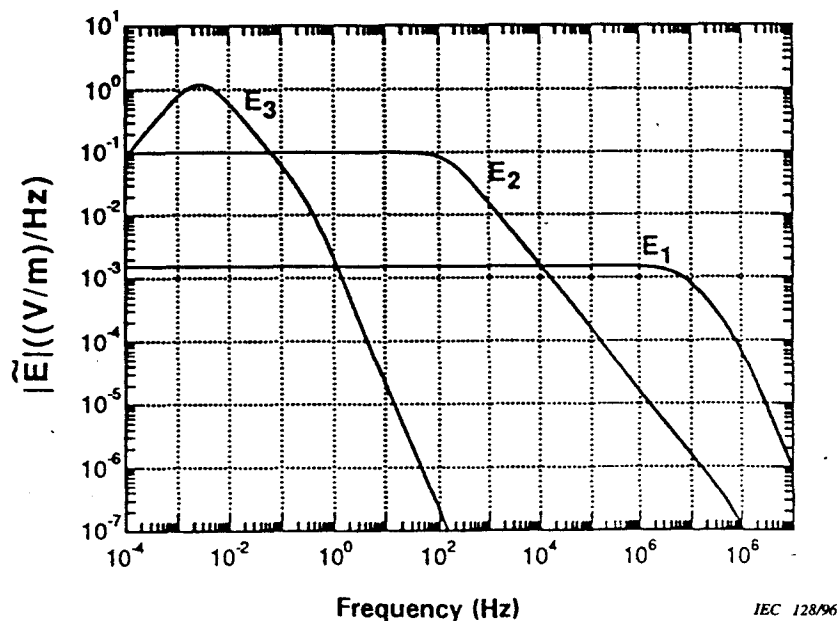


Figure 11 – Amplitude spectrum of each HEMP component

Le spectre de puissance $S(f)$ décrit la densité en énergie en fonction de la fréquence (c'est-à-dire pour le critère de champ lointain de $f > 10^3$ Hz):

$$S(f) = \frac{2|\tilde{E}(f)|^2}{Z_0} \quad (11)$$

où
 $Z_0 = 120 \pi \Omega$.

L'intégration de l'équation (11) permet de trouver la fluence de la forme d'onde instantanée E_1 dans le domaine des fréquences en donnant:

$$W_T = \int_{10^3}^{+\infty} S(f) \cdot df \quad W_f = \int_{10^3}^{f_1} S(f) \cdot df \quad (12)$$

La figure 12 indique la fluence cumulative de l'onde IEMN-HA initiale en fonction de la fréquence.

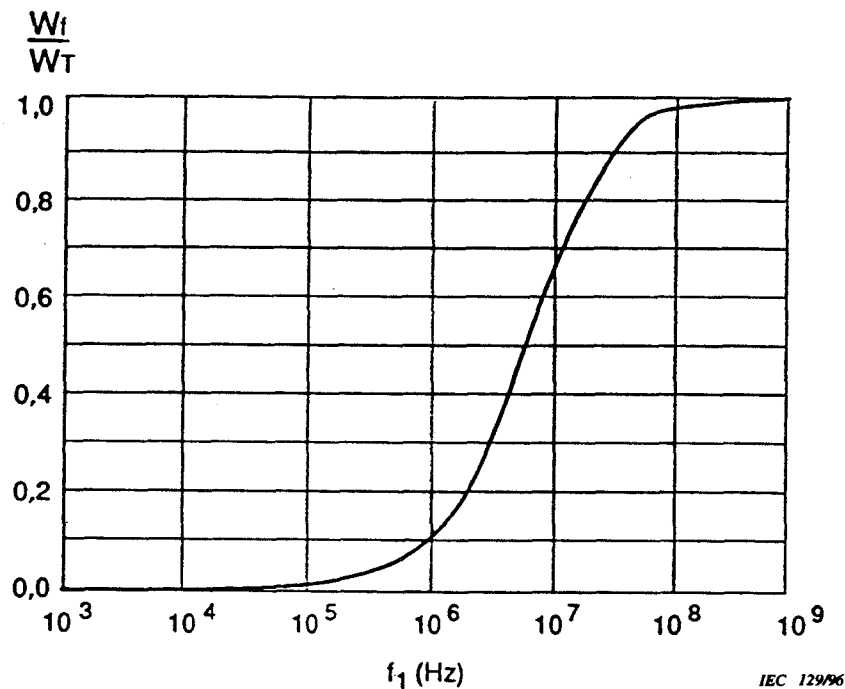


Figure 12 – Partie de la fluence énergétique de $f = 10^3$ Hz à f_1

Exemple – En dessous de 10^5 Hz la fluence est de 2%. En dessous de 10^8 Hz, elle est d'environ 98 %. Une fluence de 96 % se situe donc entre 10^5 Hz et 10^8 Hz.

Cet exemple montre que la partie importante de l'impulsion IEMN-HA initiale (du point de vue de la fluence) se situe entre 0,1 MHz et 100 MHz.

The power spectrum $S(f)$ describes the energy density as a function of frequency (i.e., for the far field criterion of $f > 10^3$ Hz):

$$S(f) = \frac{2|\tilde{E}(f)|^2}{Z_0} \quad (11)$$

where

$$Z_0 = 120 \pi \Omega.$$

The energy fluence of the early-time E_1 waveform can be found by integrating equation (11) in the frequency domain giving:

$$W_T = \int_{10^3}^{+\infty} S(f) \cdot df \quad W_f = \int_{10^3}^{f_1} S(f) \cdot df \quad (12)$$

Figure 12 shows the cumulative amount of energy fluence of the early-time HEMP as a function of frequency.

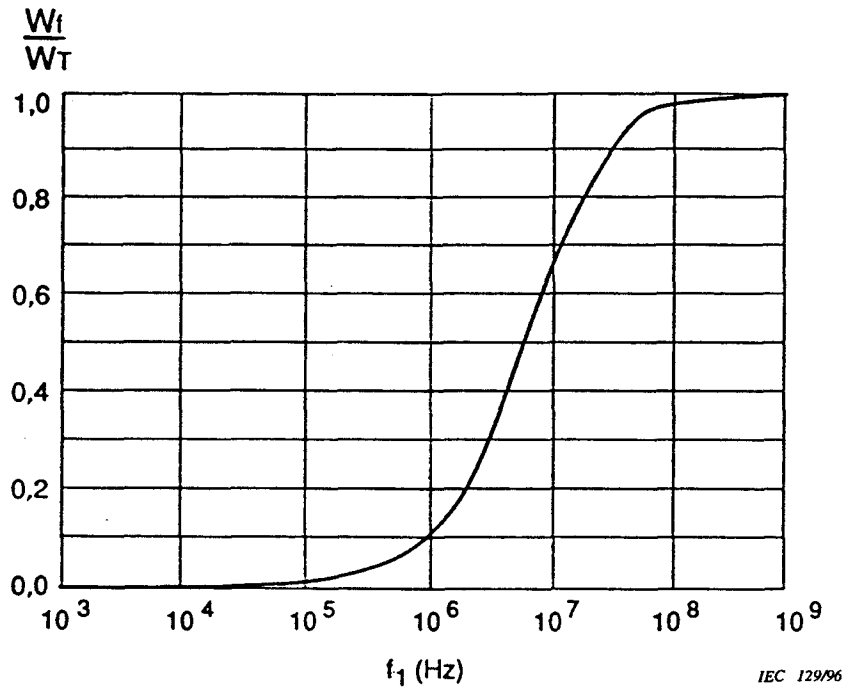


Figure 12 – Fraction of energy fluence from $f = 10^3$ Hz to f_1

Example – The energy fluence below 10^5 Hz is 2 %. Below 10^8 Hz it is about 98 %. Therefore 96 % is between 10^5 Hz and 10^8 Hz.

This example indicates that the important part of the early-time HEMP pulse (from an energy fluence point of view) is in the 0,1 MHz to 100 MHz frequency range.

Comme le montre la figure 11, les spectres d'amplitude pour E_2 et E_3 sont plus élevés que pour E_1 , pour des fréquences respectives inférieures à 10^4 Hz et 1 Hz. E_2 et E_3 n'ont cependant qu'une fluence totale de $0,013 \text{ J/m}^2$ tandis que celle de E_1 seule est de $0,114 \text{ J/m}^2$. La fluence des ondes IEMN-HA intermédiaire et finale est négligeable par rapport à l'onde IEMN-HA initiale.

Cependant, on doit souligner que l'énergie prélevée dans un champ magnétique par une «antenne» et conduite à une «victime» ne dépend pas seulement de la fluence incidente totale W_T du champ. En effet, les tensions et courants induits au niveau des systèmes électroniques dépendent également des mécanismes de couplage, de la topologie du système, de l'adaptation d'impédance, et, pour les réseaux de distribution électrique, des courants de suite après rupture diélectrique.

5.6 Evaluation des ondes IEMN-HA initiale, intermédiaire et finale

Les effets des ondes IEMN-HA intermédiaire et finale sont souvent négligés dans les publications courantes, car on ne retient que leurs faibles amplitudes. On pourrait penser que des valeurs crête de 100 V/m (période intermédiaire) et de 40 mV/m (période finale) sont négligeables par rapport aux $50\,000 \text{ V/m}$ de la période initiale.

Ceci est parfois le cas, tout particulièrement lorsque le système atteint (sous-système, équipement) n'est pas de trop grande dimension (zones de couplages réduites) lorsqu'il s'agit, par exemple, d'équipements mobiles comme les véhicules. Ceci limite le couplage IEMN-HA à des fréquences plus élevées. Le couplage d'énergie entre une source (champ électromagnétique) et un système atteint est de toute façon souvent sélectif en fréquence.

Les conclusions générales importantes doivent tenir compte des mécanismes de couplage et non pas du seul spectre IEMN-HA (figure 11). Si un système atteint est de grande dimension (systèmes d'alimentation électrique ou lignes de télécommunications à grande distance) ou s'il s'agit d'une petite installation reliée à ces lignes, il est important de prendre en compte les signaux de période intermédiaire et finale des ondes IEMN à haute altitude.

5.7 Réflexion et transmission

Lorsque l'onde IEMN-HA heurte le sol (ondes initiale ou intermédiaire seulement), une partie de l'impulsion se transmet par l'intermédiaire de l'interface air-sol et le reste se réfléchit (voir figure 13).

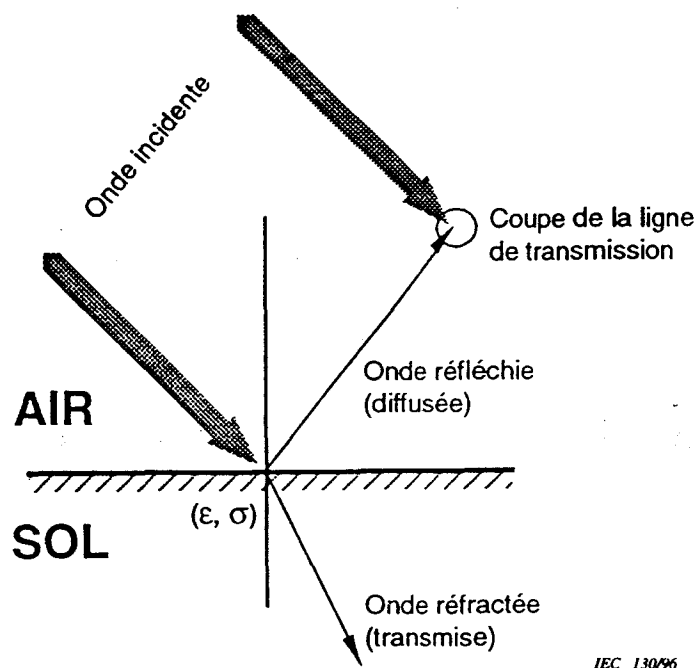


Figure 13 – Représentation des ondes incidente, réfléchie et réfractée

As shown earlier in figure 11, the amplitude spectra for E_2 and E_3 are higher than E_1 for frequencies below 10^4 Hz and 1 Hz, respectively. In spite of this situation, E_2 and E_3 have a total energy fluence of only $0,013 \text{ J/m}^2$ while E_1 alone has $0,114 \text{ J/m}^2$. The energy fluence of the intermediate-time and late-time HEMP is negligible compared to the early-time HEMP.

However, it shall be emphasized that the energy which is picked up from an electromagnetic field by an "antenna" and then conducted to a "victim" does not only depend upon the total incident energy fluence W_T of the field. This is because the voltages and currents that are induced at the electronics level in a system are also functions of the coupling mechanisms, the system topology, the impedance matching, and in power grids, the follow-on currents after a dielectric breakdown.

5.6 Weighting of the early, intermediate and late-time HEMP

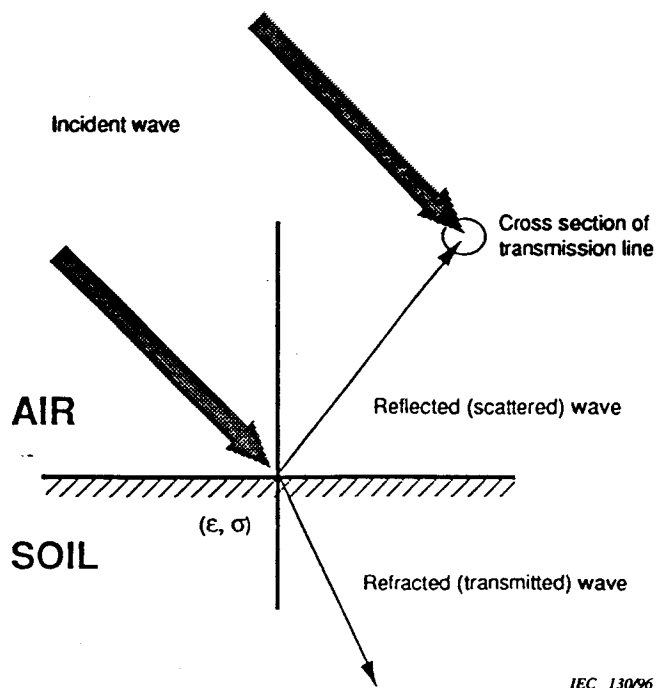
Intermediate-time and late-time HEMP effects are often neglected in the open literature, because only their small amplitudes are considered. One might believe that 100 V/m (intermediate-time) and 40 mV/m (late-time) peak values may be neglected compared to the 50 000 V/m of the early-time part.

This is sometimes valid, especially if the "victim" system (subsystem, equipment) is not too large in its physical dimensions (small coupling areas), e.g. mobile equipment such as vehicles. This limits the HEMP coupling to higher frequencies. However, often the mechanism of coupling energy from a source (electromagnetic field) to a victim is frequency selective.

General conclusions of importance shall not be made from the HEMP spectrum (figure 11) alone without considering the coupling mechanism. If a victim system is very large (such as electric utility power systems or long telecommunication lines) or if a small installation is connected to these lines, it is important to consider the intermediate and the late-time signals of the high-altitude EMP.

5.7 Reflection and transmission

When the HEMP wave (early or intermediate-time HEMP portions only) impinges on the ground, part of the energy pulse is transmitted through the air-ground interface, whereas the remainder is reflected (see figure 13).



IEC 130/96

Figure 13 – Representation of incident, reflected and refracted waves

En pratique, l'onde incidente se trouve presque toujours modifiée par d'autres structures situées au voisinage de la «victime» potentielle. Par exemple, le champ situé près des lignes électriques et des câbles de communication souterrains se trouve modifié par le sol de sorte que le champ appliqué aux câbles n'est pas le champ de l'onde incidente mais le champ total.

Pour les câbles souterrains, le champ total est la partie du champ incident transmise dans le sol, c'est-à-dire la partie de l'onde subsistant après réflexion à l'interface air/terre et absorption dans le sol. Un collecteur aérien du type ligne électrique ou un pylône d'antenne radio reçoit l'énergie à la fois des impulsions directes et réfléchies.

Les figures 14a et 14b montrent des exemples de champ électrique horizontal total (incident et réfléchi) en fonction de différentes hauteurs au-dessus d'une surface hautement conductrice et en fonction d'une hauteur donnée, pour différentes conductivités du sol (voir figure 1 pour la définition des angles).

La figure 15 montre un exemple de différents angles de site pour une hauteur et une conductivité caractéristiques.

Les figures 16a et 16b donnent des exemples de champ transmis dans le sol pour différentes conductivités et différentes profondeurs.

Ces exemples montrent clairement l'influence de la terre sur l'impulsion du champ électrique incident. Il est très important de tenir compte des effets de la réflexion et de la transmission lors d'analyses et de tests relatifs aux ondes IEMN-HA.

In almost all practical cases, the incident wave is altered by other structures in the vicinity of the potential victim. The field in the vicinity of power lines and buried communication cables, for example, is modified by the ground, so that the field impressed on the cable is not the field of the incident wave but the total field.

For the buried cable, the total field is the portion of the incident field that is transmitted into the soil, that is, the portion remaining after the reflection at the air/earth interface and absorption in the soil. An above-ground collector, such as an overhead power line or a radio antenna tower, receives energy from both the direct and reflected pulses.

Figures 14a and 14b show examples for the total horizontal electric field (incident plus reflected) for different heights above a highly conducting surface and for a given height over different soil conductivities (see figure 1 for definition of angles).

Figure 15 shows an example for different angles of elevation for a typical height and ground conductivity.

Figures 16a and 16b show examples of the field transmitted into soil for different soil conductivities and for different depths.

These examples clearly show the effect of the earth on the incident electric field pulse. It is very important to consider the effects of reflection and transmission when performing analyses and tests with HEMP waveforms.

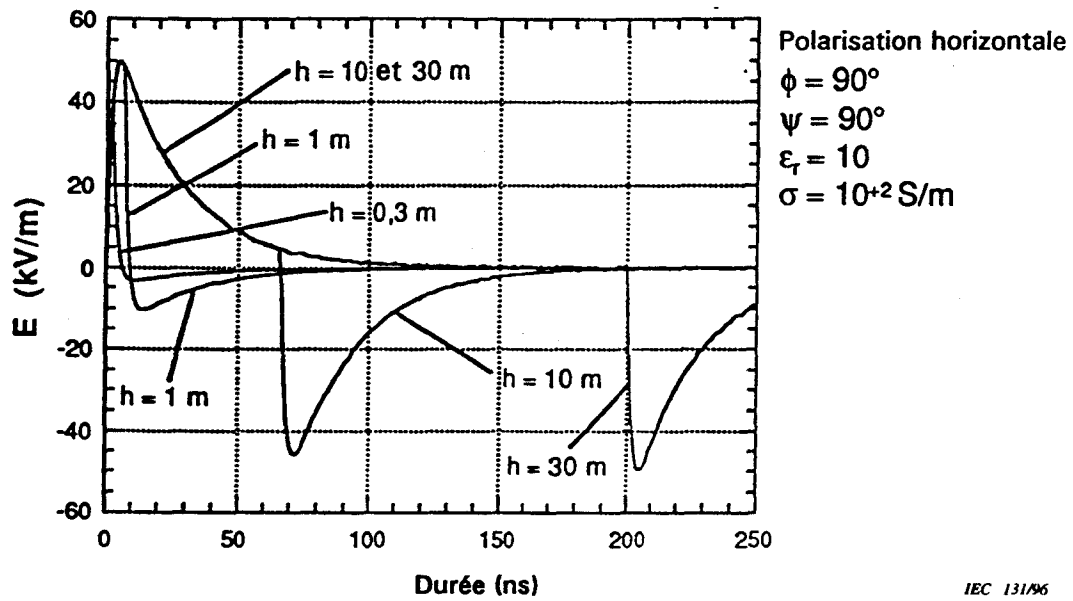


Figure 14a – En fonction de différentes hauteurs au-dessus d'une surface très conductrice

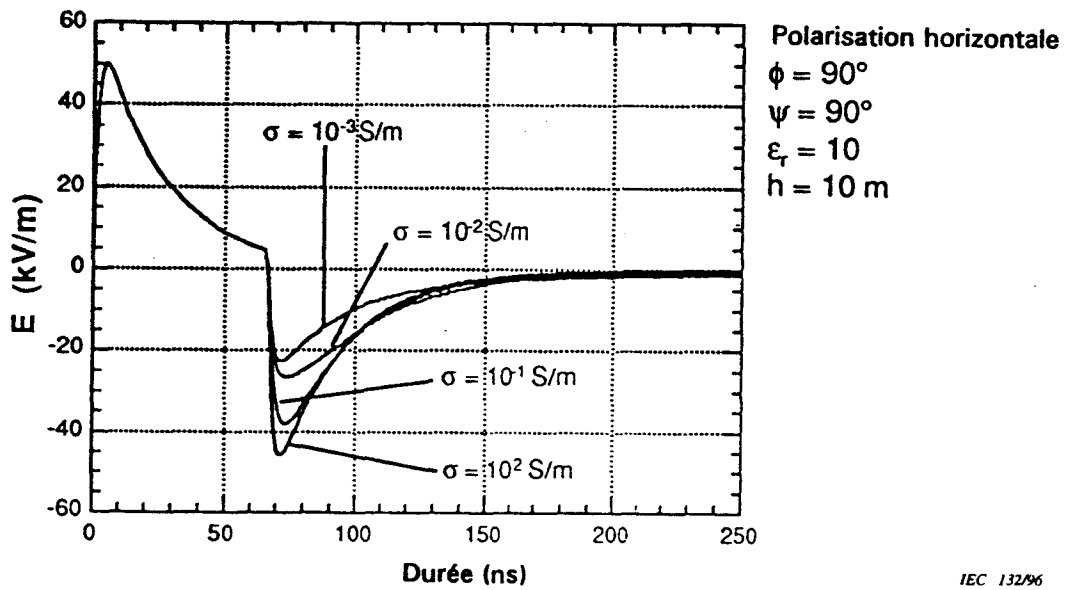


Figure 14b – En fonction de différentes conductivités du sol

Figure 14 – Champ électrique horizontal total calculé comme la somme des champs incident et réfléchi pour une IEMN-HA (partie initiale uniquement)

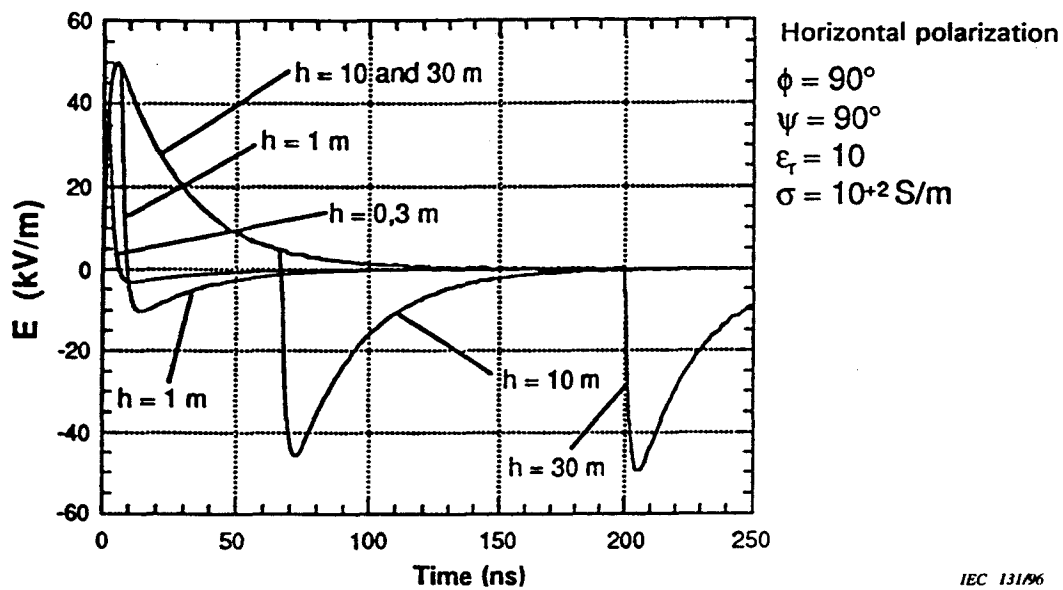


Figure 14a – For different heights above a highly conducting surface

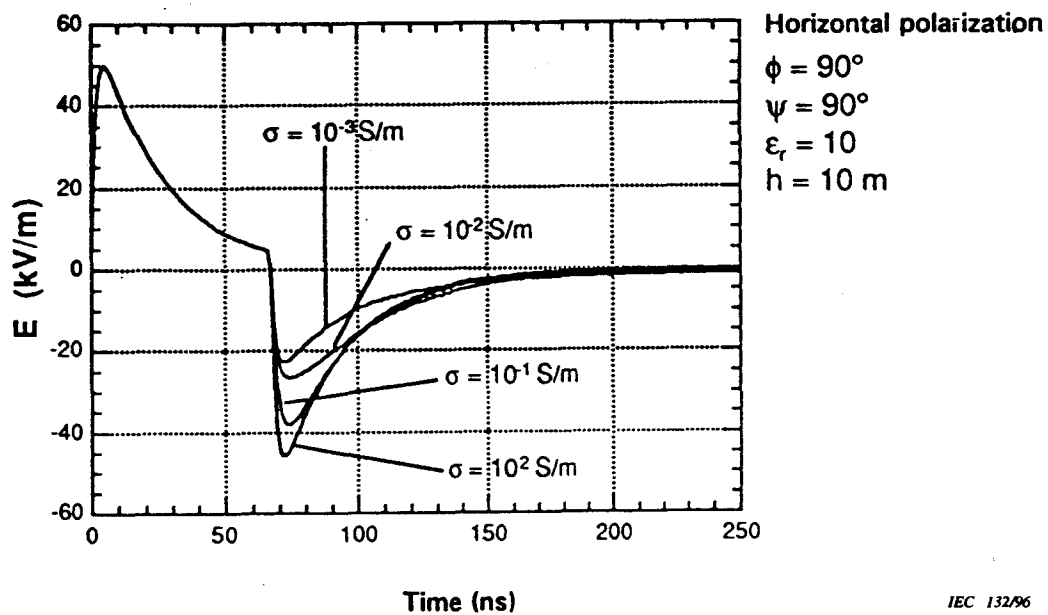


Figure 14b – For different soil conductivities

Figure 14 – Calculated total horizontal electric field as a sum of the incident plus reflected fields for a HEMP (early-time part only)

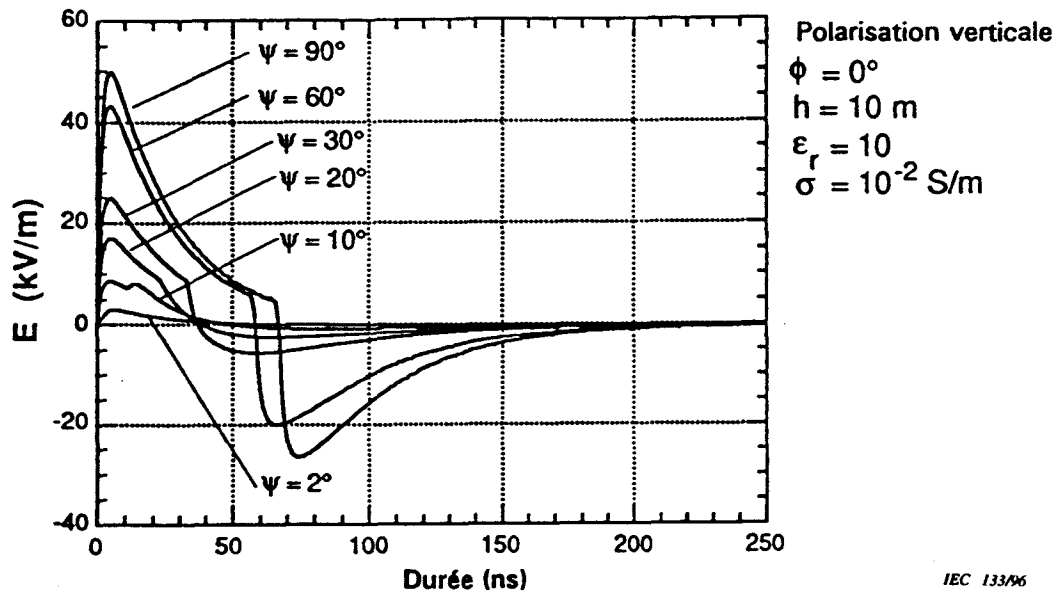
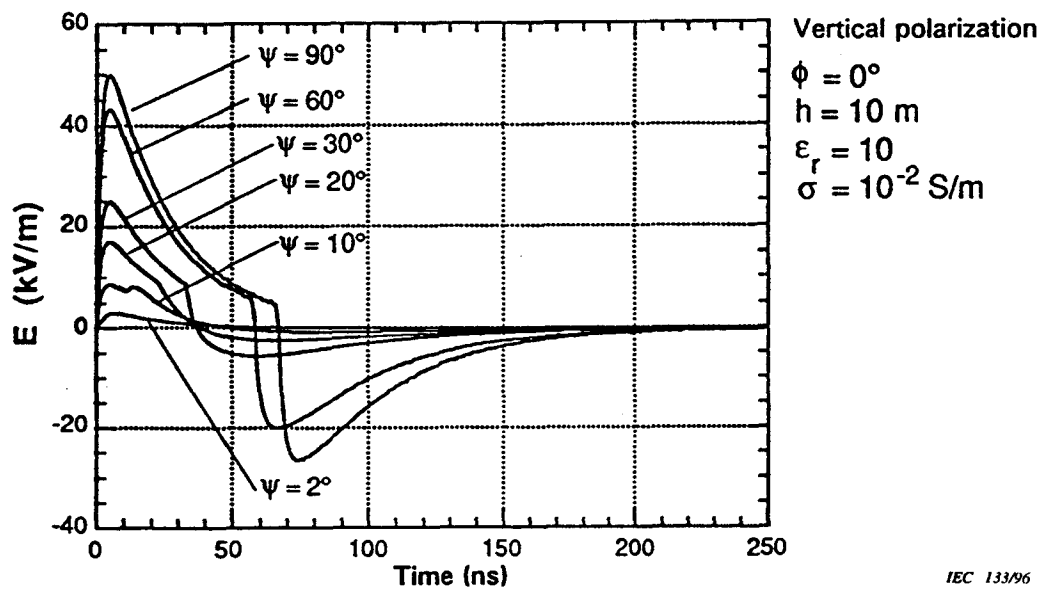


Figure 15 – Champ électrique horizontal total calculé comme la somme des champs incident et réfléchi pour une IEMN-HA (partie initiale uniquement), en fonction de différents angles de site



IEC 133/96

Figure 15 – Calculated total horizontal electric field as a sum of the incident plus reflected fields for a HEMP (early-time part only) for different angles of elevation

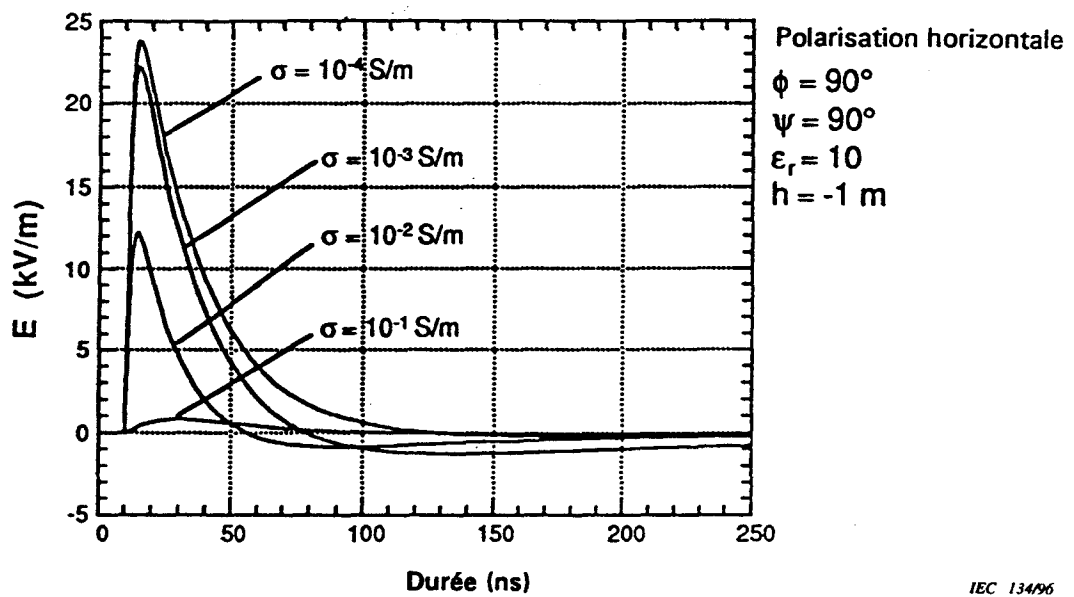


Figure 16a – En fonction de différentes conductivités du sol

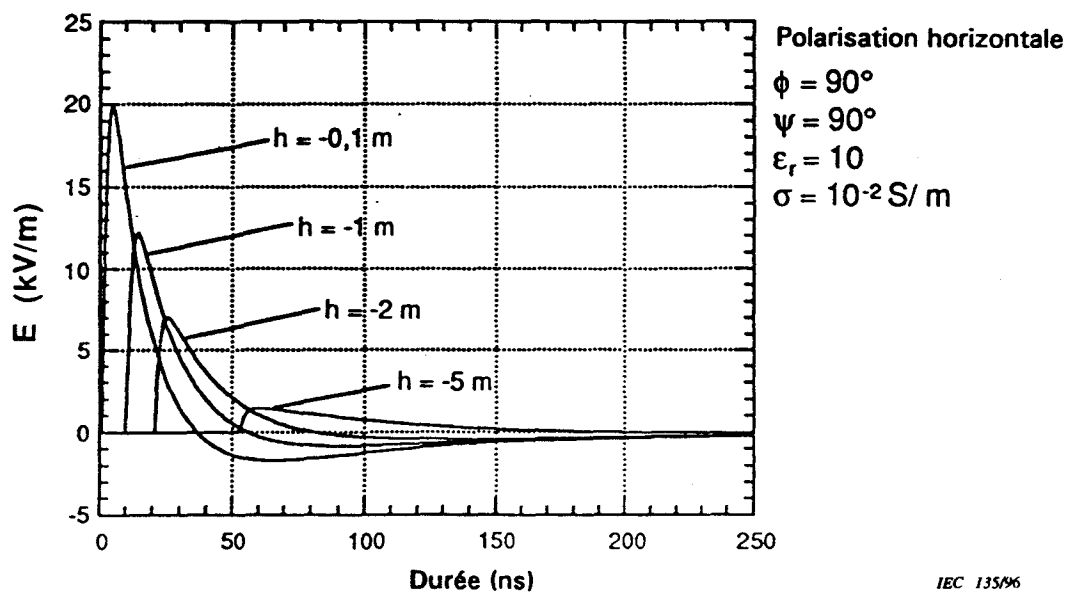


Figure 16b – En fonction de différentes profondeurs dans le sol

Figure 16 – Champs électriques horizontaux transmis calculés pour une IEMN-HA (période initiale uniquement)

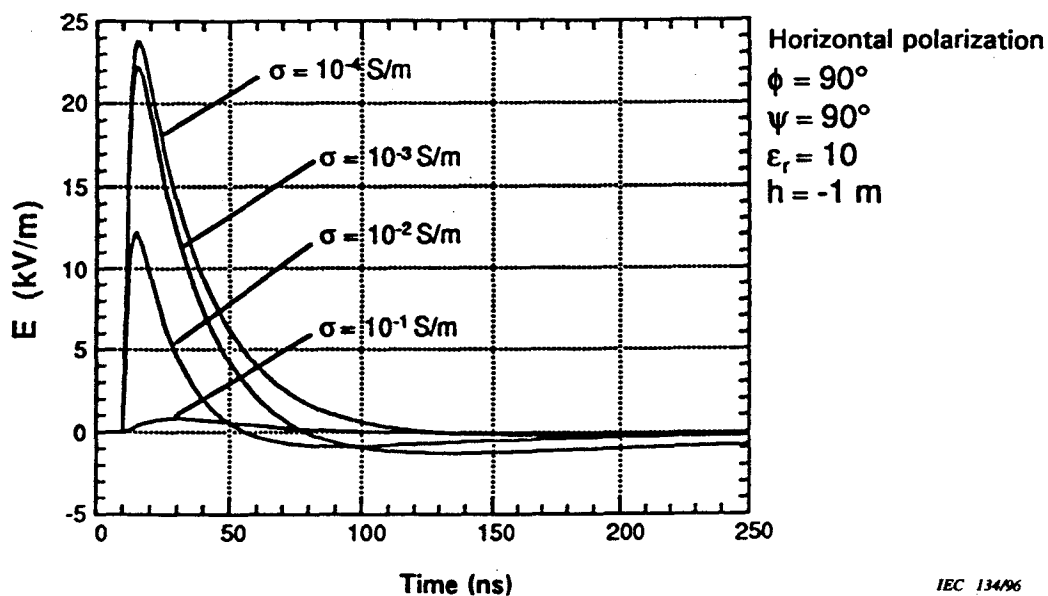


Figure 16a – For different soil conductivities

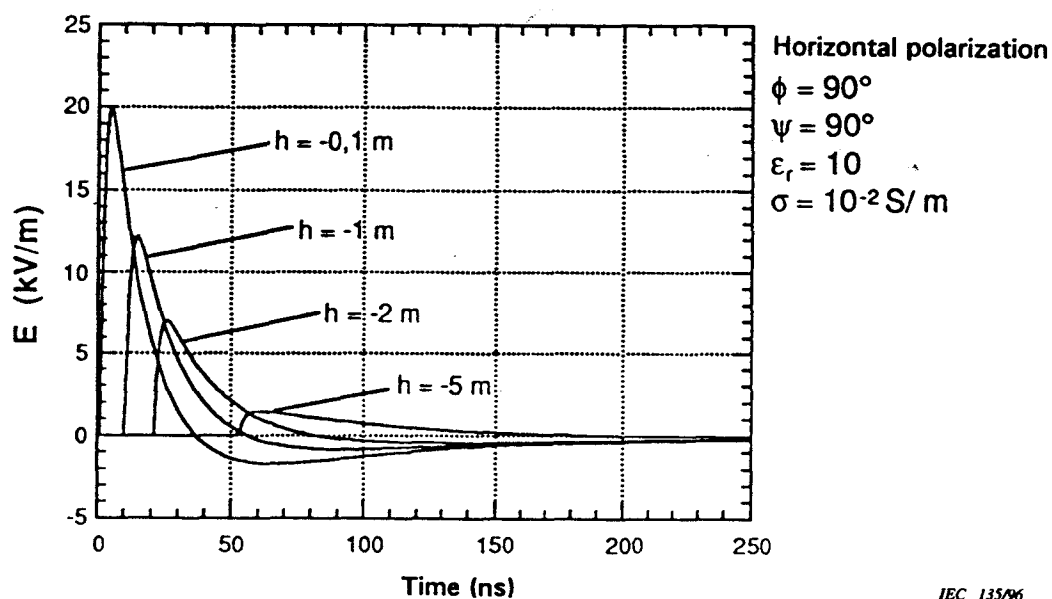


Figure 16b – For different depths in the soil

Figure 16 – Calculated transmitted horizontal electric fields for a HEMP (early-time only)

ICS 33.100

Typeset and printed by the IEC Central Office
GENEVA, SWITZERLAND